

CAD/CAM/CAE工程应用丛书

ANSYS系列

ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通

CAE应用联盟 组编　刘浩 等编著

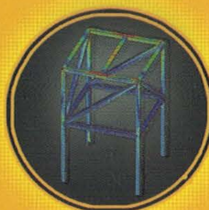
本书核心内容包含

- 机械结构基础分析
- 加工过程仿真分析
- 装配与复合材料分析
- 锤击法施工仿真分析
- 起重机综合分析
- 钢筋混凝土基本问题分析
- 钢结构及钢筋混凝土结构分析
- 膜结构及网壳结构分析
- 基础工程分析
- 桥梁工程实例分析
- 隧道工程实例分析





附赠全书范例素材 DVD 光盘







机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



VISIT…

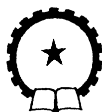
LANZAROTE Caliente.COM

CAD/CAM/CAE 工程应用丛书 · ANSYS 系列

ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通

CAE 应用联盟　组　编

刘　浩　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书主要介绍 ANSYS 15.0 的操作命令及其在工程结构数值分析中的使用方法和技巧。全书分基础介绍和实际工程应用两个层次，讲述了 ANSYS 软件的使用方法，工程背景深厚，内容丰富，讲解详尽，内容安排由浅入深，适用于不同层次的 ANSYS 用户。

全书共分 3 篇，第 1 篇基础知识篇，内容包括 ANSYS 背景知识介绍，几何建模技术与技巧，网格划分技术，加载与求解技术，通用与时间后处理技术以及 ANSYS 参数化设计语言专题知识。第 2 篇机械工程应用篇，依托机械工程中常见的实例，按照不同的分析方式，分层次分类别地进行了详尽的操作演示与讲解。第 3 篇土木工程应用篇，根据土木工程中的不同种类问题，选取相关领域内最具代表性的工程问题为实例，进行建模及加载求解，并以工程中的常用技术控制指标为依据，进行后处理分析。

本书可作为高等院校机械工程与土木工程相关专业的高年级本科生、研究生的教材，也可供上述专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通 / 刘浩等编著；CAE 应用联盟组编.
—北京：机械工业出版社，2014.8（2016.1重印）
（CAD/CAM/CAE 工程应用丛书）
ISBN 978-7-111-47915-4

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①刘… ②C… Ⅲ. ①有限元分析-应用程序 Ⅳ. ①O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 209194 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：张淑谦
责任编辑：张淑谦
责任校对：张艳霞
责任印制：李　洋

三河市国英印务有限公司印制

2016 年1 月第 1 版 • 第 2 次印刷
184mm×260mm • 32.75 印张 • 810 千字
4001－55000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-47915-4
ISBN 978-7-89405-535-4（光盘）
定价：89.00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教 材 网：http://www.cmpedu.com
销 售 一 部：（010）68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销 售 二 部：（010）88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**

出 版 说 明



随着信息技术在各领域的迅速渗透，CAD/CAM/CAE 技术已经得到了广泛的应用，从根本上改变了传统的设计、生产、组织模式，对推动现有企业的技术改造、带动整个产业结构的变革、发展新兴技术、促进经济增长都具有十分重要的意义。

CAD 在机械制造行业的应用最早，使用也最为广泛。目前其最主要的应用涉及机械、电子、建筑等工程领域。世界各大航空、航天及汽车等制造业巨头不但广泛采用 CAD/CAM/CAE 技术进行产品设计，而且投入大量的人力、物力及资金进行 CAD/CAM/CAE 软件的开发，以保持自己技术上的领先地位和国际市场上的优势。CAD 在工程中的应用，不但可以提高设计质量，缩短工程周期，还可以节省大量建设投资。

各行各业的工程技术人员也逐步认识到 CAD/CAM/CAE 技术在现代工程中的重要性，掌握其中的一种或几种软件的使用方法和技巧，已成为他们在竞争日益激烈的市场经济形势下生存和发展的必备技能之一。然而，仅仅知道简单的软件操作方法是远远不够的，只有将计算机技术和工程实际结合起来，才能真正达到通过现代的技术手段提高工程效益的目的。

基于这一考虑，机械工业出版社特别推出了这套主要面向相关行业工程技术人员的“CAD/CAM/CAE 工程应用丛书”。本丛书涉及 AutoCAD、Pro/ENGINEER、Creo、UG、SolidWorks、Mastercam、ANSYS 等软件在机械设计、性能分析、制造技术方面的应用，以及 AutoCAD 和天正建筑 CAD 软件在建筑和室内配景图、建筑施工图、室内装潢图、水暖、空调布线图、电路布线图以及建筑总图等方面的应用。

本套丛书立足于基本概念和操作，配以大量具有代表性的实例，并融入了作者丰富的实践经验，使得本丛书内容具有专业性强、操作性强、指导性强的特点，是一套真正具有实用价值的书籍。

机械工业出版社

前　　言

现代工程技术的发展要求计算能力的提高。计算能力的提高有多种途径，应用大型商业通用软件就是其中之一。

ANSYS 功能强大，简单易学，是最通用和高效的商用有限元软件之一，拥有全球最大的用户群。它融结构、传热学、流体、电磁、声学和爆破分析于一体，具有极为强大的前后处理及计算分析能力，能够同时模拟结构、热、流体、电磁以及多种物理场间的耦合效应。

命令流是 ANSYS 软件的一大特色，功能强大且使用十分方便。命令流类似于 FORTRAN 语言，能够完成所有的分析过程。命令流也是 ANSYS 参数化有限元分析、批处理、优化设计、自适应网格以及二次开发的主要基础。用户掌握命令流方式后，能够极大地丰富分析手段，提高工作效率。

1．本书特色

由浅入深，循序渐进：本书首先从 ANSYS 基础讲起，再辅以工程中的应用案例帮助读者尽快掌握使用 ANSYS 进行有限元分析的技能。

步骤详尽，实例典型：本书以 ANSYS 15.0 为根据，依托大量的工程实例，具体讲解运用 ANSYS 高级有限元分析软件处理工程问题的方法与详细步骤。本书的目的是使读者系统掌握 ANSYS 的使用方法，能够对各种工程结构进行规划、建模、加载求解与结果处理，并编写相应的命令流文件。通过学习实际工程应用案例的具体操作是掌握 ANSYS 的最好方式。本书通过综合应用案例，透彻详尽地讲解了 ANSYS 在多方面的应用。

内容充实，易学易懂：本书专题实例中的每个例子都包含了 GUI 操作和 APDL 命令流语句两种方式，两种方式在效果上完全等价。其中，GUI 方式通俗易懂且分析步骤一目了然；而 APDL 方式则方便快捷，适合复杂问题的分析。读者应同时掌握两种分析方式，根据不同的具体问题，采用更为方便的方式。

2．本书内容

本书以初中级读者为对象，结合编者多年 ANSYS 的使用经验与实际工程应用案例，将 ANSYS 软件的使用方法与技巧详细地讲解给读者。本书在讲解过程中步骤详尽、内容新颖，讲解过程辅以相应的案例，使读者在阅读时一目了然，从而快速掌握书中所讲内容。

本书基于 ANSYS 15.0，讲解了 ANSYS 的基础知识和综合应用。全书分为 3 篇：

第 1 篇基础知识篇，共 7 章，主要讲解 ANSYS 软件的基本应用。本篇按 ANSYS 分析流程，讲解包括模型的建立、单元控制、网格划分、加载、求解及后处理等内容，为后面更深入的应用打下基础。

第 2 篇机械工程应用篇，共 5 章。以机械工程中的常见问题为原型，讲解建模、分析计算和后处理操作，帮助读者掌握如何使用 ANSYS 解决机械工程应用中常见的工程问题。

第 3 篇土木工程应用篇，共 6 章。涵盖了土木工程方面的典型工程实例，具有非常重要的参考价值，帮助读者掌握如何使用 ANSYS 解决土木工程应用中常见的工程问题。

3．读者对象

本书适用于下列读者：

★大中专院校的在校生

★参加工作实习的“菜鸟”

★广大科研工作人员

★初学 ANSYS 有限元分析的技术人员

★相关培训机构的教师和学员

★有限元分析爱好者

4．读者服务

读者在学习本书的过程中如遇到有关的技术问题，可以发邮件到邮箱 caxart@126.com，或者访问博客 http://blog.sina.com.cn/caxart，编者会尽快给予解答。

5．本书编者

本书主要由刘浩编写，参与编写的还有丁金滨、唐家鹏、高飞、温正、石良臣、陈艳霞、林金宝、凌桂龙、王芳、陈培见、刘成柱、宋玉旺、张岩、韩希强、丁凯、张亮亮、孙国强、于苍海、郭海霞、沈再阳、李昕、张文电、陈峰浩、王菁、张建伟和李成芬。

虽然编者在本书的编写过程中力求叙述准确、完善，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望读者和同仁能够及时指出，共同促进本书质量的提高。

最后再次希望本书能为读者的学习和工作提供帮助！

编　者

目　　录

出版说明
前言

第 1 篇　基础知识篇

第 1 章　绪论 ……… 2
1.1　有限单元法概述 ……… 2
1.1.1　有限元法历史 ……… 2
1.1.2　有限元法的基本概念 ……… 3
1.2　ANSYS 15.0 基本操作 ……… 3
1.2.1　ANSYS 15.0 的启动与退出 ……… 3
1.2.2　ANSYS 15.0 操作界面 ……… 4
1.2.3　ANSYS 15.0 文件管理 ……… 7
1.2.4　ANSYS 15.0 有限元分析流程 ……… 10
1.3　本章小结 ……… 11
第 2 章　建立模型 ……… 12
2.1　建模前知识准备 ……… 12
2.1.1　量纲问题 ……… 12
2.1.2　坐标系问题 ……… 14
2.2　自底向上建模 ……… 18
2.2.1　模型尺寸及相关参数 ……… 18
2.2.2　建模过程 ……… 18
2.3　自顶向下建模 ……… 20
2.3.1　相关参数 ……… 20
2.3.2　建模过程 ……… 20
2.3.3　布尔运算常用命令 ……… 21
2.4　直接建立有限元模型 ……… 22
2.4.1　节点的生成 ……… 22
2.4.2　单元的生成 ……… 22
2.5　一些快速建模命令 ……… 23
2.5.1　复制命令 ……… 24
2.5.2　镜像命令 ……… 24
2.5.3　对象的选择与删除 ……… 24
2.6　CAD 几何模型导入 ……… 24
2.7　本章小结 ……… 26
第 3 章　单元与单元的控制 ……… 27
3.1　ANSYS 单元介绍 ……… 27
3.1.1　结构单元 ……… 27
3.1.2　热单元 ……… 48
3.1.3　电磁单元 ……… 49
3.1.4　耦合场单元 ……… 52
3.1.5　流体单元 ……… 53
3.2　单元属性的设置 ……… 54
3.2.1　单元类型（TYPE） ……… 54
3.2.2　实常数（REAL） ……… 55
3.2.3　材料特性（MAT） ……… 55
3.2.4　截面特性设置（SECTION） ……… 55
3.3　本章小结 ……… 56
第 4 章　网格划分 ……… 57
4.1　网格的控制 ……… 57
4.1.1　智能网格划分 ……… 57
4.1.2　全局单元尺寸控制 ……… 57
4.1.3　默认单元尺寸控制 ……… 58
4.1.4　关键点尺寸控制 ……… 59
4.1.5　线尺寸控制 ……… 59
4.1.6　面尺寸控制 ……… 61
4.2　简单网格划分实例 ……… 61
4.2.1　几何模型的导入 ……… 62
4.2.2　定义单元属性 ……… 62
4.2.3　网格的控制 ……… 62
4.2.4　网格的清除 ……… 64
4.2.5　局部网格 ……… 65
4.3　通过拉伸生成网格 ……… 66
4.4　映射网格划分 Mapped ……… 67
4.4.1　多边形面的映射网格划分 ……… 67

4.4.2　多面体的映射网格划分……69
4.5　扫掠网格划分 Sweep……69
4.5.1　体扫掠基本知识（Sweep）……70
4.5.2　体扫掠的操作步骤与使用条件……70
4.6　本章小结……72
第 5 章　模型加载及求解分析……73
5.1　加载的基础知识……73
5.1.1　荷载的种类……73
5.1.2　荷载步……74
5.1.3　加载方式类型及特点……75
5.2　施加约束……76
5.2.1　在关键点（或节点）上加载位移约束……76
5.2.2　在线（或面）上加载位移约束……77
5.2.3　耦合……78
5.2.4　约束方程……80
5.3　施加荷载……82
5.3.1　集中荷载……82
5.3.2　分布荷载……82
5.3.3　体荷载……85
5.3.4　惯性荷载……87
5.3.5　耦合场荷载……87
5.3.6　轴对称荷载与反作用力……87
5.3.7　初应力荷载……88
5.3.8　由表型数组定义荷载……89
5.3.9　荷载显示与控制……90
5.4　设定分析类型与求解方法……91
5.4.1　分析类型设置……91
5.4.2　分析基本选项设置……92
5.5　荷载步文件法……93
5.5.1　荷载步文件的建立法……93
5.5.2　荷载步文件法求解……93
5.5.3　荷载步文件的查看或修改、删除……94
5.6　本章小结……94
第 6 章　求解与后处理……95
6.1　通用后处理……95
6.1.1　读入结果文件……95
6.1.2　分析结果的绘图显示……96
6.1.3　结果查看器……101
6.1.4　分析结果的列表显示……102
6.1.5　结果的运算处理……105
6.1.6　旋转结果到不同的坐标系……106
6.1.7　荷载工况……107
6.2　时间历程后处理……108
6.2.1　时间历程后处理窗口介绍……108
6.2.2　定义变量……111
6.2.3　变量运算……112
6.2.4　变量与数组……112
6.2.5　变量的显示……113
6.3　本章小结……113
第 7 章　参数化设计语言……114
7.1　参数化设计语言基础知识……114
7.1.1　APDL 语言的输入……114
7.1.2　APDL 语言的参数……114
7.1.3　APDL 语言的流程控制……124
7.1.4　宏文件……127
7.1.5　函数、运算符以及常用控制命令……129
7.2　APDL 命令流应用详解……140
7.2.1　模型的建立……140
7.2.2　网格划分……143
7.2.3　边界条件……144
7.2.4　求解……146
7.3　本章小结……146

第 2 篇　机械工程应用篇

第 8 章　机械结构基础分析……148
8.1　基础知识……148
8.2　螺栓强度分析……150
8.2.1　建立模型……151

8.2.2 定义单元与材料…………159
8.2.3 定义边界条件……………160
8.2.4 求解与后处理……………162
8.3 起重机结构分析………………165
8.3.1 问题描述……………………165
8.3.2 设置分析环境………………166
8.3.3 定义单元与材料属性……166
8.3.4 建立有限元模型…………168
8.3.5 施加边界条件………………173
8.3.6 求解……………………………175
8.3.7 显示变形图…………………175
8.3.8 显示结果云图………………176
8.3.9 查看矢量图…………………176
8.3.10 查看支座反力……………177
8.3.11 查看轴力……………………177
8.3.12 查询 E 点的挠度…………178
8.4 模型简化方法实例……………179
8.4.1 设置分析环境………………179
8.4.2 定义单元与材料…………181
8.4.3 建立模型……………………182
8.4.4 加载及求解…………………184
8.4.5 后处理…………………………187
8.5 本章小结……………………………191
第 9 章 加工过程仿真分析……………192
9.1 热力学基础知识………………192
9.1.1 符号与单位…………………193
9.1.2 传热学经典理论回顾……193
9.1.3 热传递的方式………………193
9.1.4 线性与非线性………………194
9.1.5 边界条件、初始条件……195
9.1.6 热分析误差估计…………195
9.2 焊接过程仿真……………………195
9.2.1 概述……………………………195
9.2.2 分析过程……………………198
9.3 铸造过程仿真……………………209
9.3.1 概述……………………………209
9.3.2 分析过程……………………210
9.4 热-结构耦合问题………………223
9.4.1 概述……………………………223
9.4.2 分析过程……………………224
9.5 本章小结……………………………230
第 10 章 装配与复合材料分析…………231
10.1 非线性问题概述………………231
10.1.1 非线性分析基础知识……232
10.1.2 非线性问题的分类………232
10.1.3 非线性分析的收敛问题……233
10.2 螺栓联接件的接触分析……234
10.2.1 实例背景……………………234
10.2.2 分析过程……………………236
10.3 复合材料分析……………………259
10.3.1 概述……………………………259
10.3.2 复合材料梁的分析………263
10.4 大变形问题………………………272
10.4.1 问题描述……………………273
10.4.2 分析过程……………………273
10.5 本章小结……………………………284
第 11 章 锤击法施工仿真分析…………285
11.1 ANSYS 显式动态功能模块简介……285
11.1.1 显式动态分析的流程……285
11.1.2 显式动态单元……………287
11.1.3 显式动态分析建模………291
11.1.4 显式动态分析的边界条件……295
11.1.5 显式动态分析求解………302
11.1.6 显式动态接触分析………305
11.1.7 显式动态分析的材料模型……311
11.1.8 显式动态分析中的刚体……322
11.1.9 显式动态分析后处理……325
11.1.10 跌落测试模块……………329
11.2 锤击法施工分析实例…………331
11.2.1 问题背景……………………331
11.2.2 分析过程……………………331
11.3 本章小结……………………………340
第 12 章 起重机综合分析………………341

12.1 实例背景 …… 341
12.2 分析过程 …… 342
12.2.1 静力学分析 …… 342
12.2.2 瞬态动力学分析 …… 359
12.2.3 模态分析 …… 367
12.3 本章小结 …… 370

第 3 篇　土木工程应用篇

第 13 章　钢筋混凝土基本问题分析 …… 372
13.1 钢筋混凝土板 …… 372
13.1.1 问题简述 …… 372
13.1.2 前处理 …… 372
13.1.3 加载及求解 …… 376
13.1.4 后处理 …… 378
13.2 混凝土开裂 …… 382
13.2.1 混凝土的裂缝模型 …… 382
13.2.2 分析中用到的概念 …… 383
13.2.3 问题描述 …… 383
13.2.4 前处理 …… 384
13.2.5 加载及求解 …… 387
13.2.6 计算结果分析 …… 389
13.3 预应力钢筋混凝土 …… 392
13.3.1 预应力在 ANSYS 中的实现 …… 392
13.3.2 问题描述 …… 392
13.3.3 前处理 …… 393
13.3.4 加载及求解 …… 399
13.3.5 后处理 …… 401
13.4 本章小结 …… 403
第 14 章　钢结构及钢筋混凝土结构分析 …… 404
14.1 钢结构排架受力分析 …… 404
14.1.1 钢材特点 …… 404
14.1.2 问题简述 …… 404
14.1.3 前处理 …… 405
14.1.4 加载及求解 …… 411
14.1.5 后处理 …… 414
14.2 钢筋混凝土框架结构简单分析 …… 416
14.2.1 问题简述 …… 416
14.2.2 前处理 …… 417
14.2.3 求解 …… 422
14.2.4 后处理 …… 423
14.3 本章小结 …… 425
第 15 章　膜结构及网壳结构分析 …… 426
15.1 膜结构 …… 426
15.1.1 相关知识简介 …… 426
15.1.2 问题简述 …… 426
15.1.3 前处理 …… 427
15.1.4 施加约束及荷载 …… 428
15.1.5 找形分析 …… 429
15.2 空间单层网壳 …… 431
15.2.1 网壳分类及简介 …… 431
15.2.2 问题简述 …… 431
15.2.3 参数设置 …… 432
15.2.4 建模 …… 433
15.2.5 特征屈曲分析 …… 434
15.2.6 非线性分析 …… 437
15.3 本章小结 …… 441
第 16 章　基础工程分析 …… 442
16.1 房屋刚性独立基础 …… 442
16.1.1 独立基础 …… 442
16.1.2 问题简述 …… 442
16.1.3 前处理 …… 443
16.1.4 加载及求解 …… 445
16.1.5 后处理 …… 447
16.2 考虑接触单元桩基分析 …… 449
16.2.1 问题简述 …… 450
16.2.2 单元及材料属性设定 …… 450
16.2.3 建模 …… 451
16.2.4 加载及求解 …… 457
16.2.5 后处理 …… 458
16.3 本章小结 …… 460
第 17 章　桥梁工程实例分析 …… 461
17.1 钢桁架桥 …… 461
17.1.1 问题简述 …… 461

17.1.2 前处理 ……………………… 462
17.1.3 加载及求解 ……………… 466
17.1.4 一般后处理 ……………… 467
17.2 大跨度悬索桥………………… 469
17.2.1 悬索桥背景简介………… 469
17.2.2 问题简述………………… 470
17.2.3 单元及材料参数………… 470
17.2.4 建模 ……………………… 471
17.2.5 找形分析………………… 475
17.2.6 施工过程模拟 …………… 477
17.2.7 悬索桥全结构静力分析……………………… 479
17.2.8 悬索桥的地震动力响应……………………… 481
17.3 本章小结 ……………………… 482
第 18 章 隧道工程实例分析…………… 483
18.1 山体隧道开挖………………… 483
18.1.1 隧道开挖问题 …………… 483
18.1.2 问题简述………………… 483
18.1.3 前处理 …………………… 484
18.1.4 求解选项及边界条件设置………………………… 489
18.1.5 基于单元生死的开挖过程求解………………………… 491
18.1.6 后处理 …………………… 495
18.2 地铁站台的地震响应分析 ……………………………… 498
18.2.1 相关知识………………… 498
18.2.2 问题简述………………… 498
18.2.3 前处理 …………………… 499
18.2.4 加载及求解……………… 504
18.2.5 一般后处理……………… 506
18.2.6 时间历程后处理………… 507
18.3 本章小结……………………… 510
参考文献 ……………………………………… 511

第 1 篇

基础知识篇

本篇主要介绍有限元以及 ANSYS 15.0 软件，旨在让读者对 ANSYS 及其相关知识背景有个概念性了解，以便为更深入地学习打下概念基础。

ANSYS 作为一款有限元分析软件，使用它之前，用户必须了解有限元法的相关知识。虽然实际的有限元求解过程由计算机完成，不需要人工进行计算，但对于有限元的概念必须有所认识。ANSYS 软件经过不断改进，也发生了不少变化。目前市场上各种版本共存，用户有必要对其发展过程有所了解。

根据由浅入深的原则，本篇第 1 章先详细介绍了 ANSYS 软件的有限元理论基础及其发展史，使读者对 ANSYS 系列软件的背景有清晰的了解；第 2～6 章以 GUI 界面操作方式系统介绍了 ANSYS 的各部分功能模块，教会读者面对一个工程如何筹划方案、建立模型、分析计算、结果处理等；第 7 章则以专题的形式详尽介绍了 ANSYS 的程序化设计语言 APDL 的使用方法。

第 1 章 绪　　论

ANSYS 系列软件是基于有限单元法的大型通用商用有限元软件。本章旨在帮助读者了解 ANSYS 软件的理论背景，有限单元法的相关知识以及 ANSYS 软件的发展历程及功能概况。

本章学习目标

- 了解有限元法的相关基础知识。
- 了解 ANSYS 系列软件的基本操作。

1.1 有限单元法概述

FEM（Finite Element Method），译为有限单元法。实际应用中，它往往被称为有限元分析（FEA），是求解偏微分方程的一种数值方法。FEM 是一种高效能、常用的计算方法，它将连续体离散化为若干有限大小的单元体的集合，以求解连续体的力学问题。

有限元法在早期是以变分原理为基础发展起来的，所以它广泛应用于以拉普拉斯方程和泊松方程所描述的各类物理场中。自从 1969 年以来，某些学者在流体力学中应用加权余数法中的迦辽金法（Galerkin）或最小二乘法等同样获得了有限元方程，因而有限元法可应用于以任何微分方程所描述的各类物理场中，而不再要求这类物理场和泛函的极值问题有所联系。

1.1.1 有限元法历史

20 世纪 50 年代，大型电子计算机投入了解算大型代数方程组的工作，这为实现有限元技术准备好了物质条件。1960 年前后，美国的 R.W.Clough 教授及我国的冯康教授分别独立地在论文中提出了“有限单元”这样的名词。此后，这样的叫法被大家接受，有限元技术从此正式诞生。

在有限元分析的发展初期，由于其基本思想和原理的“简单”和“朴素”，以至于许多学术权威都对其学术价值有所鄙视，国际著名刊物《Journal of Applied Mechanics》许多年来都拒绝刊登有关有限元分析的文章。然而现在，有限元分析已经成为数值计算的主流，不但国际上存在如 ANSYS 等数种通用有限元分析软件，而且涉及有限元分析的杂志也有几十种之多。

国际上早在 20 世纪 50 年代末、60 年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。其中最为著名的是由美国国家宇航局（NASA）在 1965 年委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的 NASTRAN 有限元分析系统。该系统发展至今已有几十个版本，是目前世界上规模最大、功能最强的有限元分析系统。

从那时到现在，世界各地的研究机构和大学也发展了一批规模较小但使用灵活、价格较低的专用或通用有限元分析软件，主要有德国的 ASKA、英国的 PAFEC、法国的 SYSTUS、

美国的 ABAQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC 和 STARDYNE 等公司的产品。

1.1.2 有限元法的基本概念

有限元法，也叫有限单元法，它的基本思想是将一个结构或连续体的求解域离散为若干子域（单元），并通过其边界上的节点相互连接成为组合体。

有限元法用每一个单元内所假设的近似函数来分片表示全求解域内待求的未知场变量。而每个单元内的近似函数由未知函数或及其导数在单元各个节点上的数值和与其对应的插值函数来表示。由于在连接相邻单元的节点上，场函数应具有相同的数值，因而将它们用作数值求解的基本未知量。这样一来，求解原来待求场函数的无穷自由度问题转换为求解场函数节点值的有限自由度问题。

有限元法又是通过和源问题数学模型（基本方程、边界条件）等效的变分原理或加权余数法，建立求解基本未知量（场函数的结点值）的代数方程组或微分方程组。此方程组称为有限元求解方程，并表示成规范的矩阵形式。接着用数值方法求解此方程，从而得到问题的解答。

结构离散（有限元建模）的内容有网格划分，即把结构按一定规则分割成有限单元和边界处理，也就是把作用于结构边界上的约束和载荷处理为节点约束和节点载荷。其中要求：离散结构必须与原始结构保形——单元的几何特性。一个单元内的物理特性必须相同——单元的物理特性。

单元与节点中的单元（即原始结构）离散后，满足一定几何特性和物理特性的最小结构域。节点即单元与单元间的连接点。节点力即单元与单元间通过节点的相互作用力。节点载荷即作用于节点上的外载。

插值函数（或位移函数）是用以表示单元内物理量变化（如位移或位移场）的近似函数。由于该近似函数常由单元节点物理量值插值构成，故称为插值函数，如单元内物理量为位移，则该函数称为位移函数。

选择位移函数的一般原则是：位移函数在单元节点的值应等于节点位移（即单元内部是连续的）；所选位移函数必须保证有限元的解收敛于真实解。要注意的是为了便于微积分运算，位移函数一般采用多项式形式，在单元内选取适当阶次的多项式可得到与真实解接近的近似解。

1.2 ANSYS 15.0 基本操作

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件，它能与多数 CAD 软件接口，实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。

1.2.1 ANSYS 15.0 的启动与退出

启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，启动画面如图 1-1 所示。稍后即可弹出如图 1-2 所示的 Mechanical APDL Product Launcher 15.0。

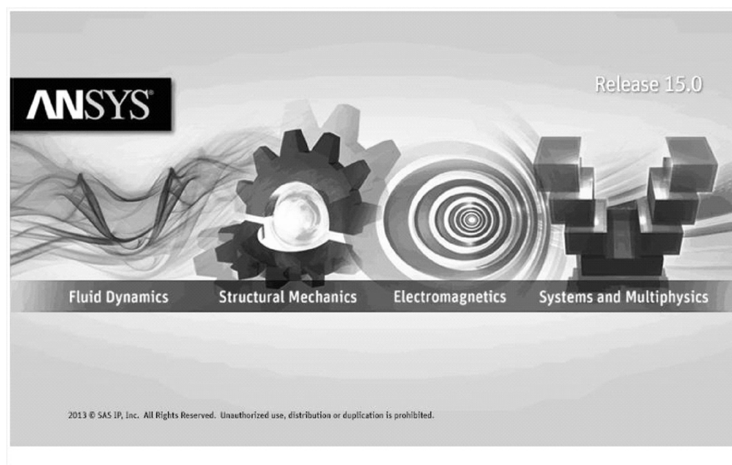


图 1-1　ANSYS 15.0 启动画面

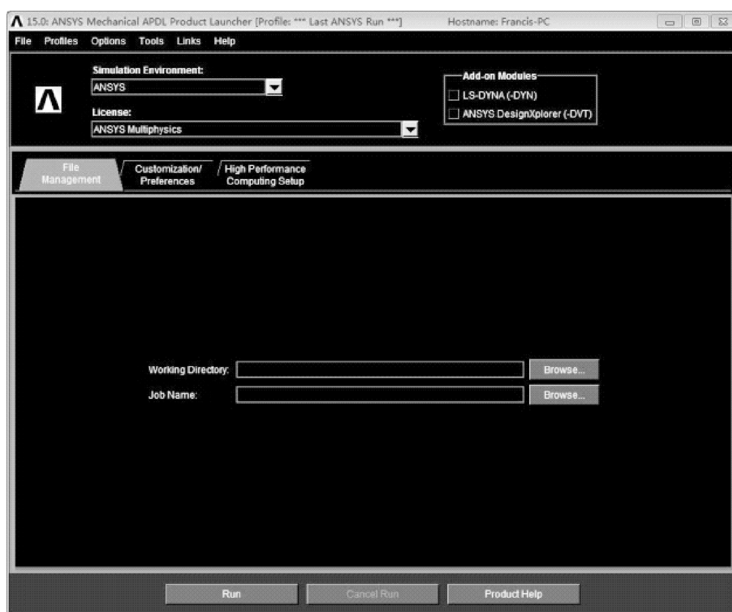


图 1-2　Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口

Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口方便用户管理自己的项目。在 Working Directory 中可以输入工作目录，在 Job Name 中可以输入用户定义的项目名称。

1.2.2 ANSYS 15.0 操作界面

单击 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口中的 Run 按钮，即可进入 ANSYS 15.0 的 GUI 操作界面，如图 1-3 所示。

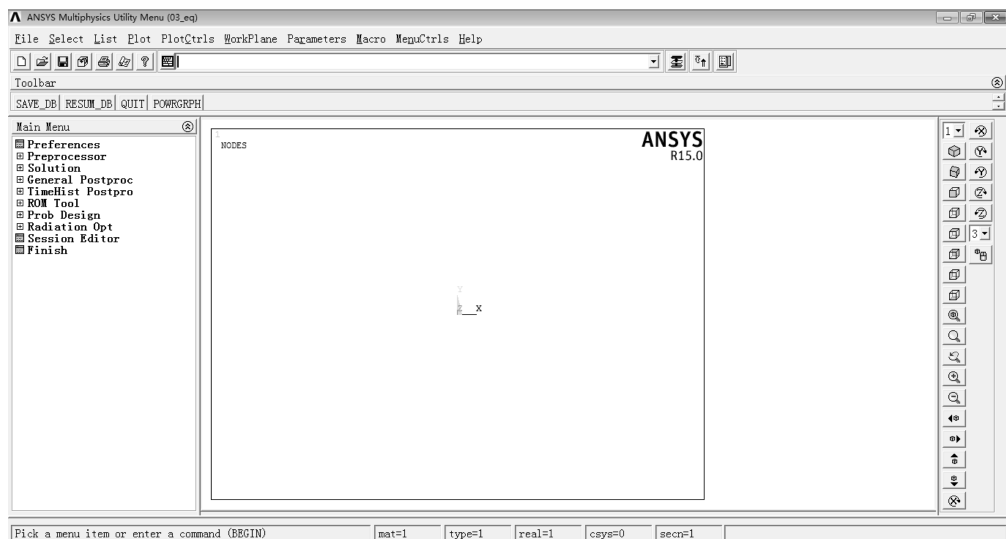


图 1-3　ANSYS 15.0 GUI 操作界面

与 GUI 操作界面同时打开的，还有图 1-4 所示的“选定 Mechanical APDL 15 Output Window”窗口。

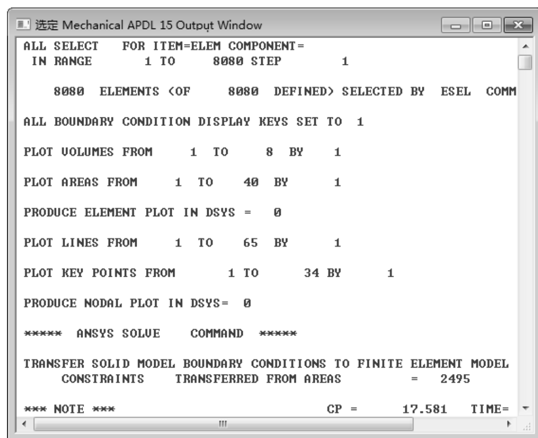


图 1-4　“选定 Mechanical APDL 15 Output Window”窗口

ANSYS 15.0 Output Window 窗口显示了 ANSYS 项目的信息，例如，定义单元、材料参数，分析过程的各种警告与错误提示，*GET 命令提取的数据等均可以在 ANSYS 15.0 Output Window 中查看到。

在 ANSYS 15.0 GUI 操作界面中有如图 1-5 所示的 ANSYS 15.0 GUI 界面主菜单（Main Menu），定义单元、建立模型、求解、后处理等命令都可以在这里找到。

如图 1-6 所示为 GUI 界面的工作区，建立的模型、分析完成后的结果、求解过程的监视等都将发生在这里。

如图 1-7 所示为 ANSYS 15.0 GUI 操作界面的通用菜单（Utility Menu）。

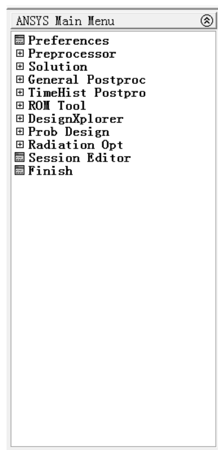


图 1-5　主菜单

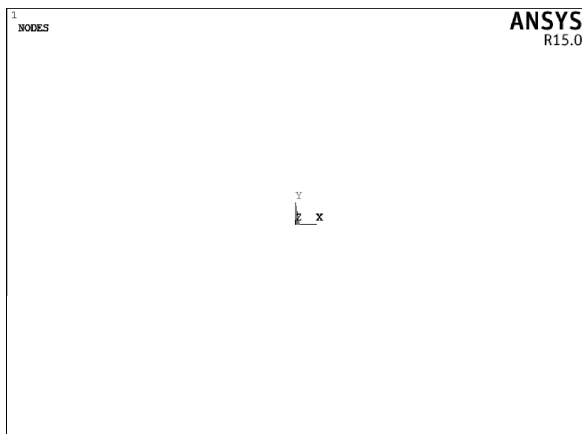


图 1-6　工作区

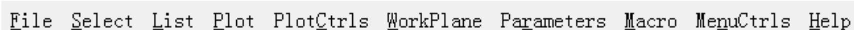


图 1-7　通用菜单

通用菜单中包含了文件管理、项目选择、工作区显示的控制、参数的定义、工作平面、帮助等功能。通用菜单中的功能在下文的介绍中将经常遇到，在此不赘述。

这里希望读者能够多加注意的是 ANSYS 的帮助系统功能。ANSYS 的帮助系统功能十分强大，进入帮助系统后，用户可以找到有关 ANSYS 的任何理论知识、操作方法等。如图 1-8 所示为 ANSYS 帮助系统。

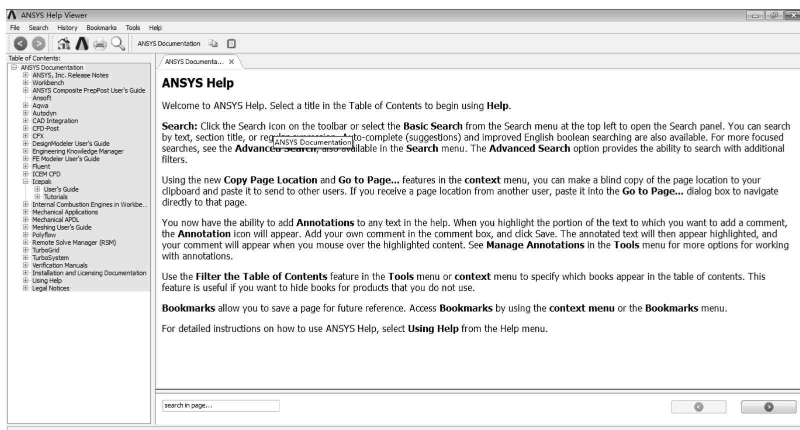


图 1-8　ANSYS 帮助系统

图 1-9 所示的是 ANSYS 命令输入框，可以在输入框中输入 APDL 命令，通过命令进行操作。



图 1-9　命令输入框

1.2.3 ANSYS 15.0 文件管理

ANSYS 软件广泛应用文件来存储和恢复数据，特别是在求解分析时。这些文件被命名为 filename.ext，这里文件名为默认的作业名，ext 是一个唯一的由 2～4 个字符组成的值，表明文件的内容。作业名是进入 ANSYS 程序后用户指定的文件名（用/FILNAME 命令或在 GUI 界面中 Utility Menu>Files>Change Jobname）。如果没有给文件起名，默认值为 FILE（或 file）。

文件名（文件名和扩展名）在某些系统中可能是小写，例如，如果文件名是“bolt”，在一个 ANSYS 问题分析结束时可能得到如下文件。

- bolt.db：数据库文件。
- bolt.emat：单元矩阵文件。
- bolt.err：错误和警告消息文件。
- bolt.log：命令输入历史文件。
- bolt.rst：结果文件。

在 ANSYS 运行结束前产生，然后又在某一时刻被删除的文件称为临时文件。在运行结束后仍然存在的文件叫永久性文件。

贯穿 ANSYS 文档组，输出文件（Jobname.OUT）是常被提到的文件之一。如果运行于 UNIX 系统，仅想把输出送到屏幕，则从启动器中选择 Iteractive，出现 Selected Product 对话框时，选择 Screen only，输出“文件”将是 ANSYS 输出窗口；如果选择 Screen and file，那么在当前的工作目录中，将会产生一个名叫 Jobname.OUT 的真实文件。

ANSYS 将不会立即把输出输到输出窗口中。输入/输出缓冲器首先必须被填满或刷新。错误和警告将刷新输入/输出缓冲器。用户也可以发出某些命令（如/OUTPUT，NLIST，KLIST）来使输入/输出缓冲器强行刷新。

根据文件如何被使用，程序相应地用文本格式（ACSII 码）或二进制格式写入文件。例如：ERR 和 LOG 文件是文本文件，而 DB、EMAT 和 RST 文件是二进制文件。通常，需要进行读（及编辑）的文件是用文本格式写入的，其他文件是用二进制格式写入的。

二进制文件可以是外部文件或内部文件。外部二进制文件能在不同计算机之间相互传送；内部二进制文件仅在写该文件的机器上调用，不能传送。在默认的情况下，所有 ANSYS 保存的二进制文件都是外部文件类型，可通过下列两种方法之一来把它改为内部文件类型。

- 使用/FTYPE 命令。
- 选择 Utility Menu>FILE>ANSYS FILE Options。

不能将数据库文件（Jobname.DB）或结果文件（Jobname.Rxx）改为内部文件。

下面是使用二进制文件的一些技巧：

- 如果不打算在不同计算机系统间传送文件，把所有的二进制文件指明为内部文件可节省 CPU 的运行时间。因为一些系统写外部类型的二进制文件要比写内部类型的二进制文件花费更多的时间。
- 当通过 FTP（文件传输协议）传输文件时，在传输前必须设置 BINARY 选项。
- 即使数据仅从文件中读取，大多数 ANSYS 二进制文件也必须使写许可可用。然而，

数据库文件（file.DB）和结果文件（file.RST，file.RTH etc.）只能为只读形式。当保存一个只读文件 file.DB 时，已有的只读文件将被存为 file.DBB。但是，不能再次保存只读文件 file.DB，因为它将试图覆盖 file.DBB，这一点 ANSYS 不允许。

- 高级版本的 ANSYS 二进制文件不兼容低版本二进制文件。例如，不能将 ANSYS 15.0 产生的二进制文件在 ANSYS 13.0 或更低版本上运行。如果这样做，可能引起严重的操作问题，向上兼容的文件见表 1-1。

表 1-1　二进制文件的兼容性

标识符	类型	兼容性	内容
BDB	Binary	—	最优设计的数据库文件（OPKEEP）
BFIN	Text	—	由 BF 命令写入的体积力插值文件（BFINT）
BRFL	Binary	—	最优设计的 FLOTRAN 结果文件（OPKEEP）
BRMG	Binary	—	最优设计的磁场结果文件（OPKEEP）
BRST	Binary	—	最优设计的结构分析结果文件（OPKEEP）
BRTH	Binary	—	最优设计的温度结果文件（OPKEEP）
CBDO	Text	—	由 D 命令写入的自由度插值文件（CBDOF）
CDB	Text	Y	文本格式数据库文件（CDWRITE）
CMAP	Text	—	彩色映像文件
CMD	Text	Y	由*CFWRITE 写入的命令文件
DB	Binary	Y	数据库文件（SAVE，/EXIT）
DBE	Binary	—	批处理模式中因 VMESH 失败产生的数据库文件
DBG	Text	—	FLOTRAN“调试”文件（包括求解信息）
DSUB	Binary	Y	使用结束的超单元 DOF 求解文件
ELEM	Text	Y	单元定义文件（EWRITE）
EMAT	Binary	Y	单元矩阵文件
ERR	Text	—	错误及警告信息文件
ESAV	Binary	Y	单元数据存储文件（注：ANSYS 非线性分析产生的 ESAV 文件可能向上不兼容）
FATG	Text	—	疲劳数据文件（FTWRITE）
FULL	Binary	—	组集的整体刚度矩阵和质量矩阵文件
GRPH	Text	Y	中性图形文件
IGES	Text	Y	由 ANSYS 实体模型产生的 IGES 文件（IGES）
LGW	Text	Y	数据库命令记录文件（LGWRITE）
Lnn	Binary	Y	载荷工况文件（LCWRITE）
LOG	Text	Y	命令输入历程文件
LOOP	Text	—	优化循环文件
MCOM	Text	Y	谱分析中的模式组合命令文件（MCOMB）
MODE	Binary	Y	模态矩阵文件（模态和屈曲分析）
MP	Text	Y	材料特性定义文件（MPWRITE）
NODE	Text	Y	节点定义文件（NWRITE）
OPO	Text	—	最终优化循环的 ANSYS 输出文件
OPT	Text	—	优化的数据文件
OSAV	Binary	—	最终优化循环的 ESAV 文件副本

（续）

标识符	类型	兼容性	内容
OUT	Text	—	ANSYS 输出文件
PARM	Text	Y	参数定义文件（PARSAVE）
PFL	Text	—	FLOTRAN 打印输出文件
PSD	Binary	—	PSD 文件（模态协方差矩阵等）
RDF	Text	—	FLOTRAN 的残留文件（FLDATA，OUTP）
RDSP	Binary	—	约化位移文件
REDM	Binary	—	约化结构矩阵文件
RFL	Binary	Y	FLOTRAN 结果文件
RFRQ	Binary	—	约化复合位移文件
RMG	Binary	Y	磁场分析的结果文件
RST	Binary	Y	结构和耦合场分析的结果文件
RSW	Text	—	FLOTRAN“管壁”结果文件
RTH	Binary	Y	温度场分析的结果文件
RUN	Text	—	FLOTRAN 运行的数据文件
SELD	Binary	Y	生成结束的超单元载荷矢量数据文件
Snn	Text	Y	载荷步文件（nn 为载荷步号）（LSWRITE）
SORD	Text	—	使用结束的超单元名及编号文件
STAT	Text	—	ANSYS 批处理运行状态文件
SUB	Binary	Y	在传输阶段产生的超单元矩阵文件
TB	Text	Y	超弹性材料常数文件（*MOONEY）
TRI	Binary	—	三角化刚度矩阵文件
USUB	Binary	Y	为超单元扩展传递而输入的重新命名 DSUB 文件
XBC	Text	—	FLOTRAN 边界条件数据文件
XGM	Text	—	FLOTRAN 几何形状数据文件
XIC	Text	—	FLOTRAN 初始条件数据文件

在许多场合，ANSYS 程序需要读取自己的文件。这个文件可能是 ANSYS 命令的文本文件或者 ANSYS 数据的二进制文件。

用/INPUT 命令（GUI 界面的 Utility Mneu>Files>Read input from 命令）读取包含 ANSYS 命令的文本文件，如表 1-2 所示。如可以读取前面 ANSYS 对话的命令记录文件（Jobname.LOG）。

例如，用下面的命令，ANSYS 程序可以从当前目录中读 MATERIAL.INP 文件。

/ INPUT，MATERIAL，INP

表 1-2　读取文件命令与 GUI 路径

命令	GUI 菜单路径	用途
*USE	Utility Menu>Macro>Execute Data Block	读取宏
PARRES	Utility Menu>Parameters>Restore parameters	读取参数文件（Jobname.PARM）
EREAD	MainMenu>Preprocessor>Creat>elements>Read Elem File	读取单元文件（Jobname.ELEM）
NREAD	MainMenu>Preprocessor>Creat>Nodes>Read Node File	读取节点文件（Jobname.NODE）

（续）

命　　令	GUI 菜单路径	用　　途
MPREAD	MainMenu>Preprocessor>Loads>Other>Change Mat Props>Read from File	读取材料特性文件（Jobname.MP）
	MainMenu>Preprocessor>Material Props>Read from File	
	MainMenu>Solution>Other>Change MatProps>Read from File	

表 1-3 列出了读取二进制文件的命令及 GUI 操作。

表 1-3　读取二进制文件

命 令	GUI 菜单路径	用　　途
RESUME	Utility Menu>File>Resume from	读取数据库文件（Jobname.DB）
	Utility Menu>File>Resume jobname.DB	
SET	Utility Menu>List>Results>Load Step Summary	读取结果文件（Jobname.RST，Jobname.RTH，Jobname.RMG，Jobname.RFL）
OPRESU	Main Menu>Design Opt>Resume	读取优化数据文件（Jobname.OPT）

1.2.4 ANSYS 15.0 有限元分析流程

ANSYS 有限元软件是一个多用途的有限元法计算机设计程序，可以用来求解结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题。因此它可应用于以下工业领域：航空航天、汽车工业、生物医学、桥梁、建筑、电子产品、重型机械、微机电系统和运动器械等。

软件主要包括 3 部分：前处理模块、分析计算模块和后处理模块。

- 前处理模块提供了一个强大的实体建模及网格划分工具，用户可以方便地构造有限元模型。
- 分析计算模块包括结构分析（可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析）、流体动力学分析、电磁场分析、声场分析、压电分析以及多物理场的耦合分析，可模拟多种物理介质的相互作用，具有灵敏度分析及优化分析能力。
- 后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示（可看到结构内部）等图形方式显示出来，也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。

与 ANSYS 软件架构对应的是，典型的 ANSYS 有限元分析流程分为如下 3 个阶段。

（1）建立有限元模型（前处理器，Preprocessor）

- 创建几何模型（导入或在 ANSYS 中建立）。
- 定义单元、材料属性。
- 划分网格。

（2）加载与求解（求解器，Solution Processor）

- 施加载荷与其他边界条件。
- 求解。

（3）查看与处理结果（后处理器，Post Processor）

- 查看分析结果。
- 导出结果数据。

● 判断结果的合理性。

1.3 本章小结



本章为读者介绍了有限单元法的起源及发展以及有限单元法催生的 ANSYS 通用有限元分析工具。

ANSYS 具有强大的结构、热力学、流体、电磁等领域的分析功能。结构静力分析用来求解外载荷引起的位移、应力和力。结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例变化。ANSYS 可以分析大型三维柔体运动。ANSYS 可处理热传递的 3 种基本类型：传导、对流和辐射热。

第 2 章　建 立 模 型

有限元分析研究的第一步就是建立用于有限元分析的模型。建立模型时，可以建立几何模型或者直接建立有限元模型。本章将对两种建模的思路进行详细介绍，并给出由其他 CAD 软件导入几何模型的方法。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 中的量纲及坐标系问题。
- 掌握 ANSYS 多种实体建立模型的方法。
- 掌握 ANSYS 直接建有限元模型的方法。
- 掌握 ANSYS 导入模型的方法。

2.1　建模前知识准备

在开始建模前，用户要先了解 ANSYS 中的量纲和坐标系问题。

虽然 ANSYS 本身并不要求给出单位，但用户在进行分析前需要做的一项重要工作就是统一单位。

建立模型时，用户首先要考虑在何种坐标系下定义模型的坐标参数方便。

2.1.1 量纲问题

一般的通用有限元软件不直接给出分析中使用的物理量的单位，ANSYS 中的单位制只是一个标识，不具有任何单位换算功能。用户所要做的统一单位工作不限于使用某一固定单位制，关键在于只要是“统一”的单位制即可。

用户的分析过程不可避免地会用到许多物理量，如长度单位 m、mm，时间单位 s、ms，质量单位 g、kg，力的单位 N、kN 等。如果所有的单位均采用国际单位制主单位，那么所有的计算结果也均为国际单位制，并不难以处理。

但在实际工程问题中，习惯单位通常与国际单位制千差万别。例如，工程实用的长度单位通常是 mm 而非主单位 m，时间单位可能是 d（天）而非主单位 s，压力单位通常是 MPa 而非主单位 Pa 等。

因此，量纲换算是一项必要的工作。

（1）基本物理量与导出物理量

基本物理量及其量纲如下。

- 长度 L。
- 质量 M。
- 时间 t。
- 温度 T。



导出物理量及其量纲如下。

- 速度：v=L/t。
- 加速度：$a=L/t^2$。
- 面积：$A=L^2$。
- 体积：$V=L^3$。
- 密度：$\rho=m/L^3$。
- 力：$f=m\cdot a=m\cdot L/t^2$。
- 力矩、能量、热量、焓等：$e=f\cdot L=m\cdot L^2/t^2$。
- 压力、应力、弹性模量等：$p=f/A=m/(t^2\cdot L)$。
- 热流量、功率等：$\psi=e/t=m\cdot L^2/t^3$。
- 热导率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)$。
- 比热容：$c=e/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)$。
- 热交换系数：$Cv=e/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)$。
- 粘性系数：$Kv=p\cdot t=m/(t\cdot L)$。
- 熵：$S=e/T=m\cdot l^2/(t^2\cdot L)$。
- 质量熵、比熵：$s=S/m= l^2/(t^2\cdot L)$。

确定了要选用的单位制，确定基本物理量后，即可以推导其余物理量。

（2）mm-t-s-K 单位制

基本物理量的单位如下。

- 长度 L= mm。
- 质量 M=t。
- 时间 t=s。
- 温度 T=K。

则可以推导出各物理量单位如下。

- 速度：v=L/t=mm/s。
- 加速度：$a=L/t^2=mm/s^2$。
- 面积：$A=L^2=mm^2$。
- 体积：$V=L^3=mm^3$。
- 密度：$\rho=m/L^3=t/mm^3$。
- 力：$f=m\cdot a=m\cdot L/t^2=N$。
- 力矩、能量、热量、焓等：$e=f\cdot L=m\cdot L^2/t^2=mJ$。
- 压力、应力、弹性模量等：$p=f/A=m/(t^2\cdot L)=MPa$。
- 热流量、功率等：$\psi=e/t=m\cdot L^2/t^3=mW$。
- 热导率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)=kg\cdot m/(s^3\cdot K)$。
- 比热容：$c=e/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)= mm^2/(s^2\cdot K)$。
- 热交换系数：$Cv=e/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)= t/(s^3\cdot K)$。
- 粘性系数：$Kv=p\cdot t=m/(t\cdot L)= t/(s\cdot mm)$。
- 熵：$S=e/T=m\cdot L^2/(t^2\cdot T)=10^{-3}\ kg\cdot m^2/(s^2\cdot K)$。
- 质量熵、比熵：$s=S/m= l^2/(t^2\cdot T)= 10^{-6}m^2/(s^2\cdot K)$。

（3）mm-kg-s-K 单位制

基本物理量的单位如下。

- 长度 L= mm。
- 质量 M=kg。
- 时间 t=s。
- 温度 T=K。

导出物理量如下。

- 速度：v=L/t=mm/s。
- 加速度：$a=L/t^2=mm/s^2$。
- 面积：$A=L^2=mm^2$。
- 体积：$V=L^3=mm^3$。
- 密度：$\rho=m/L^3=kg/mm^3$。
- 力：$f=m\cdot a=m\cdot L/t^2=mN$。
- 力矩、能量、热量、焓等：$e=f\cdot L=m\cdot L^2/t^2=\mu J$。
- 压力、应力、弹性模量等：$p=f/A=m/(t^2\cdot L)=kPa$。
- 热流量、功率等：$\psi=e/t=m\cdot L^2/t^3=\mu W$。
- 热导率：$k=\psi/(L\cdot T)=m\cdot L/(t^3\cdot T)=10^{-3}kg\cdot m/(s^3\cdot K)$。
- 比热容：$c=e/(m\cdot T)=L^2/(t^2\cdot T)= mm^2/(s^2\cdot K)$。
- 热交换系数：$Cv=e/(L^2\cdot T\cdot t)=m/(t^3\cdot T)=kg/(s^3\cdot K)$。
- 粘性系数：$Kv=p\cdot t=m/(t\cdot L)= kg/(s\cdot mm)$。
- 熵：$S=e/T=m\cdot L^2/(t^2\cdot T)=10^{-6}\ kg\cdot m^2/(s^2\cdot K)$。
- 质量熵、比熵：$s=S/m= l^2/(t^2\cdot T)= 10^{-6}m^2/(s^2\cdot K)$。

注意：选择量纲时用户应考虑以下问题。

- 确定分析中使用的物理量的数量级，避免使数据出现过大或过小的情况。
- 同一个问题中所有物理量要保持一致，计算过程中尽量不要随意转换。
- 一般而言，先确定基本物理量再确定导出物理量。但实际情况下，用户也可以根据需要先确定导出物理量再反推基本物理量。

2.1.2 坐标系问题

ANSYS 中可以使用多种坐标系，这些坐标系有不同的使用场合与用法。在此注明一句：ANSYS 的坐标系均为右手正交系。

ANSYS 中可以使用的坐标系主要有以下几种。

（1）全局坐标系

- CS，0：全局直角坐标系，也即全局笛卡儿坐标系。
- CS，1：全局柱坐标系，以 Z 方向为轴向。
- CS，2：全局球坐标系。
- CS，5：全局柱坐标系，以 Y 方向为轴向。

如图 2-1 所示即为 4 种不同的全局坐标系。

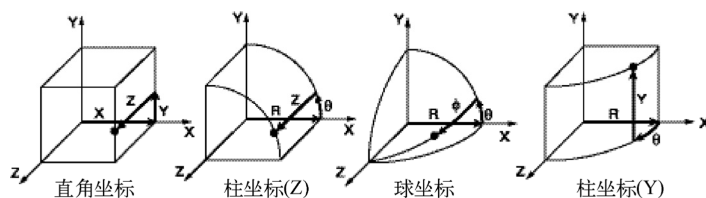


图 2-1 全局坐标系

不同的坐标系中，常数代表的面如图 2-2 所示。

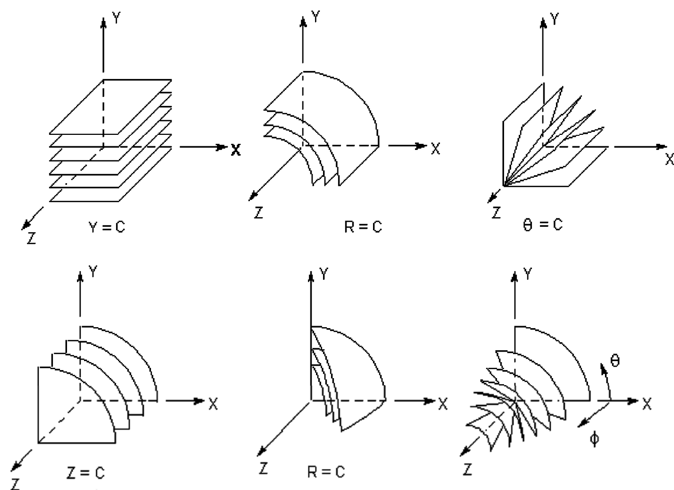


图 2-2 不同坐标系下的常数面

（2）局部坐标系

局部坐标系由用户定义，激活的坐标系是分析中特定时间的参考系。当创建了一个新的坐标系，则新的坐标系变为当前激活坐标系，如图 2-3 所示。

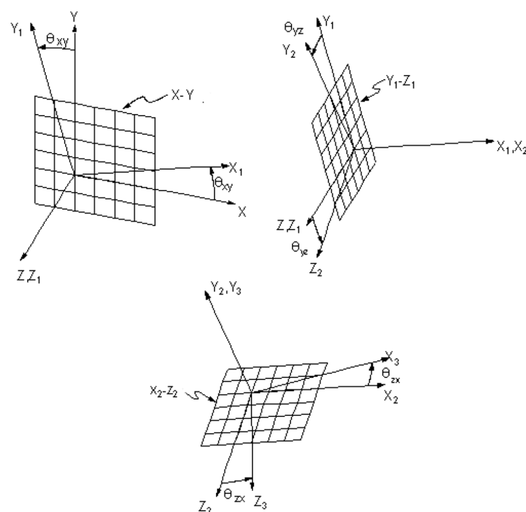


图 2-3 由全局坐标系旋转得局部坐标系

为了方便使用，用户甚至可以定义环形的局部坐标系，如图 2-4 所示。

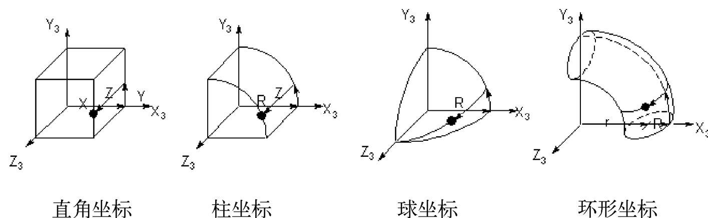


图 2-4　不同类型的局部坐标系

（3）节点坐标系

每一个节点都有一个附于其上的坐标系。节点坐标系默认为笛卡儿坐标系且与全局坐标系平行。

节点坐标系可以进行旋转，如图 2-5 所示。

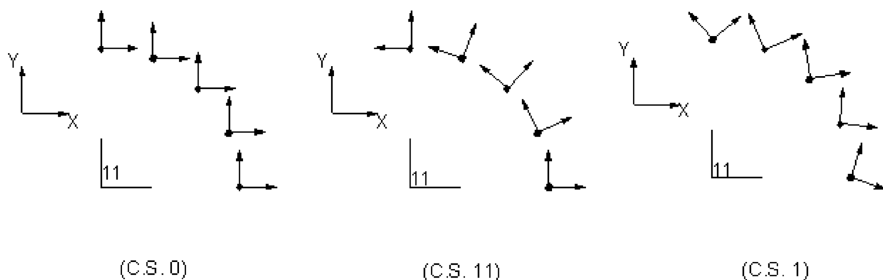


图 2-5　旋转节点坐标系

（4）单元坐标系

单元坐标系用于确定材料属性的方向，后处理中提取梁单元、壳单元的膜力等。单元坐标系的朝向参见各单元的帮助文件。

（5）结果坐标系

通用后处理器的结果是按结果坐标系进行表达的，无论节点和单元坐标如何设定，结果坐标系都默认为直角坐标系。

（6）显示坐标系

显示坐标系是在屏幕上显示定义的新基准，建议用户不要随意修改。使用柱坐标显示圆弧时，屏幕上将圆弧显示成直线，可能引起理解上的混乱。

（7）工作平面

工作平面（Working Plane）是创建几何模型的参考平面（X、Y）平面，在前处理器中用来建模型，后处理器中可用于观察截面结果。

用户可以使用 GUI 界面中的如下命令进行全局坐标系的切换。

- 选择 Main Menu> General Postproc> Surface Operations> Create Surface> Sphere> At Node。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Active CS to> Global Cartesian。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Active CS to> Global Cylindrical。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Active CS to> Global Spherical。

- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Active CS to> Specified Coord Sys。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Active CS to> Working Plane。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Offset WP to> Global Origin。

在图 2-6 所示的 Change Active CS to Specified CS 对话框中，输入坐标系编号，单击 OK 按钮即可。

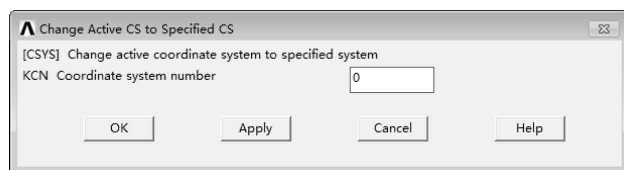


图 2-6 Change Active CS to Specified CS 对话框

用户可以选择 GUI 界面中的 Utility Menu>WorkPlane> Local Coordinate Systems> Create Local CS>At Specified Loc 命令进行局部坐标系的切换。在弹出的如图 2-7 所示的 Create Local CS at Specified Location 对话框中完成设置即可。

用户可以在 GUI 界面选择 Utility Menu>WorkPlane> Local Coordinate Systems> Create Local CS> By 3 Nodes 命令进行节点坐标的设置，根据提示拾取 3 个节点，弹出如图 2-8 所示的 Create CS By 3 Nodes 对话框。

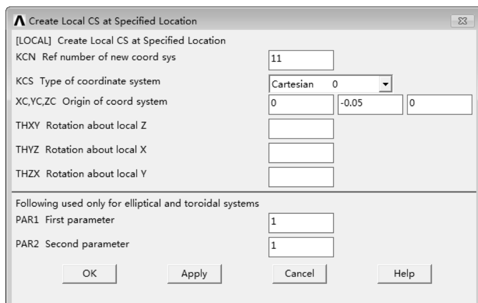


图 2-7 Create Local CS at Specified Location 对话框

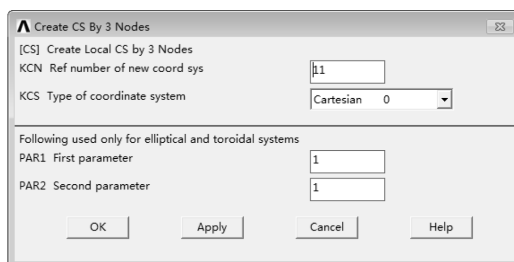


图 2-8 Create CS By 3 Nodes 对话框

设置坐标系编号与类型，单击 OK 按钮完成即可。

用户可以在 GUI 中选择如下命令之一设置显示坐标系。

- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Display CS to> Global Cartesian。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Display CS to> Global Cylindrical。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Display CS to> Global Spherical。
- 选择 Utility Menu>WorkPlane> Change Display CS to> Specified Coord Sys。

建议初学用户不要随意设置显示坐标系。例如，将显示坐标系改为柱坐标系，圆柱面会显示成平面，对于刚接触 ANSYS 的用户很可能出现各种难以处理的结果。

工作平面是一个无限平面，有原点、二维坐标系，同一时间只能定义一个工作平面，与坐标系是独立的。默认的工作平面是笛卡儿坐标系下的 X-Y 平面。

2.2 自底向上建模

自底向上建模方法是最基本的建模方法，也是最容易掌握的所谓“传统”方法。

自底向上建立实体模型时，首先要定义关键点，再利用这些已有的关键点定义较高级的图元（线、面或体），这样由点到线、由线到面、由面到体、由低级到高级。

现在以一异形柱体的建模为例介绍自底向上建模方法。

2.2.1 模型尺寸及相关参数

柱体模型如图 2-9 所示。

其中，柱高 100，底面上共有 8 个角点，坐标依次为：

点 1（0，0）；点 2（50，30）；点 3（100，0）；点 4（70，50），点 5（100，100）；点 6（50，70）；点 7（0，100）；点 8（30，50）。

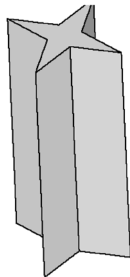


图 2-9　柱体

2.2.2 建模过程

（1）创建关键点

通过路径 Main menu > Preprocessor > Modeling > Create >Keypoints> In Active CS 得到 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，如图 2-10 所示。

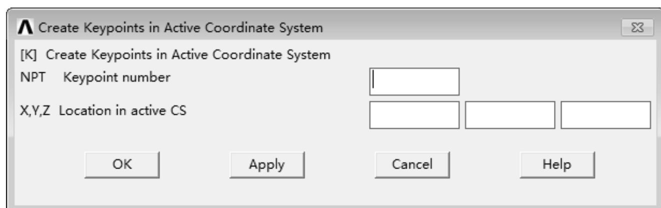


图 2-10　Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

对话框中的 NPT 输入框输入点号，第二排 X，Y，Z 为坐标值。以点 1（0，0）的生成为例，在 NPT 后的输入框输入 1，在坐标 X，Y 后相应输入框依次输入 0，0。Z 值不存在，省略即可。

单击 Apply 按钮，生成一个关键点。再依据本章 2.2.1 中给出的坐标点值生成其余关键点，全部生成后单击 OK 按钮，如图 2-11 所示。

此时可通过路径 Utility menu > List >Keypoints> Coordinate only 列出各点坐标值。

（2）由关键点生成线操作

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord。

依次拾取关键点 1～8，连接各点组成边线，再单击 OK 按钮，生成模型直线如图 2-12 所示。

（3）由线生成面操作

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create >Areas >Arbitrary >By Lines。

逆时针依次拾取所有直线，单击 OK 按钮生成面，结果如图 2-13 所示。

（4）由面生成体

本例通过拉伸操作，由面拉伸成体。

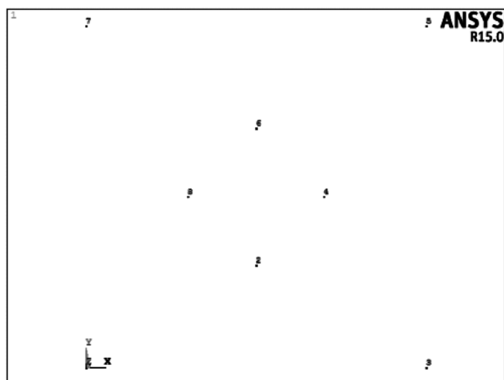


图 2-11　生成关键点

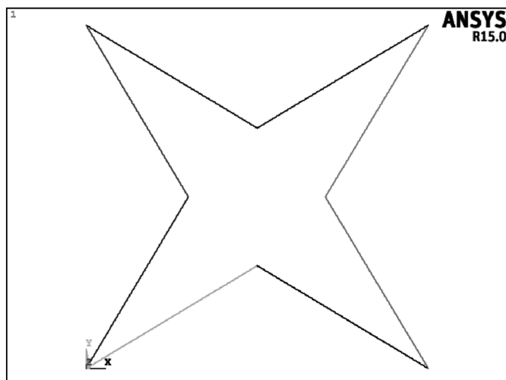


图 2-12　由点生成直线

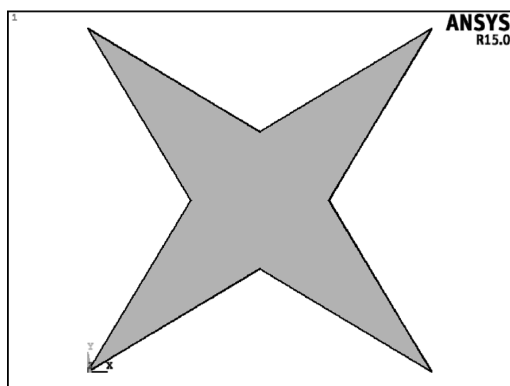


图 2-13　由线生成面

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate > Extrude > Areas > By XYZ Offset。

拾取面单元，单击 OK 按钮，DX，DY，DZ 分别设为 0，0，100，如图 2-14 所示。单击 OK 按钮，形成体，结果如图 2-15 所示。

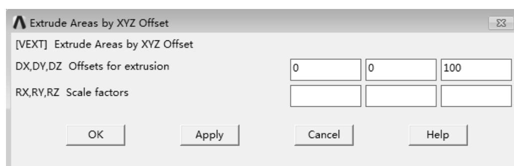


图 2-14　拉伸设置

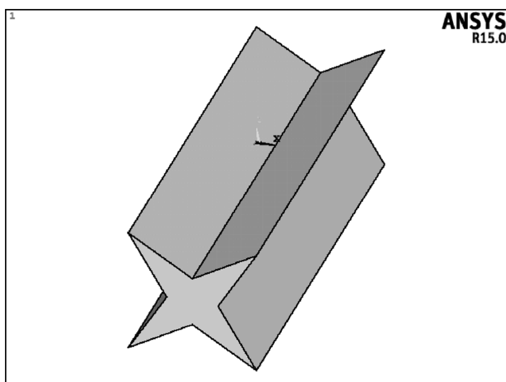


图 2-15　生成体

保存结果为 SAVE_DB，几何模型建立完毕。

2.3 自顶向下建模

不同情况应用不同建模思路，可以提高效率，方便操作。现在给出一个带孔矩形板自顶向下建模的例子。

2.3.1 相关参数

板厚度为 25mm，长为 200mm，宽为 150mm，圆孔半径为 10mm，分布在板的四角距边缘 10mm。

2.3.2 建模过程

（1）创建矩形板

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Block > By Dimensions。

输入参数：

X1，X2 = 0，200。

Y1，Y2 = 0，150。

Z1，Z2 = 0，25。

单击 OK 按钮，生成如图 2-16 所示的长方体。

（2）创建圆柱体

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Volumes > Cylinder > Solid Cylinder。

设置参数：

WP X = 20，WP Y = 20，Radius=10，Depth=25，单击 OK 按钮，生成第一个柱体模型。

同理，输入：

WP X = 180，WP Y = 20，Radius=10，Depth=25。

WP X = 180，WP Y = 130，Radius=10，Depth=25。

WP X = 20，WP Y = 130，Radius=10，Depth=25。

生成其余 3 个柱体，得到图形如图 2-17 所示。

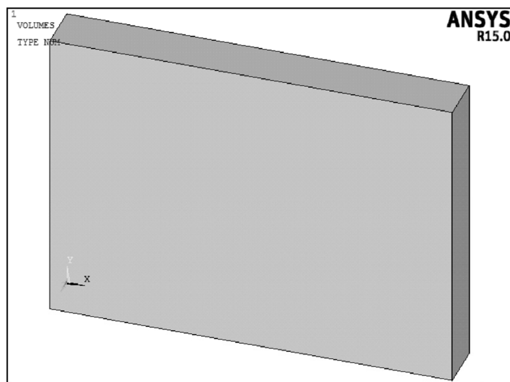


图 2-16　长方体

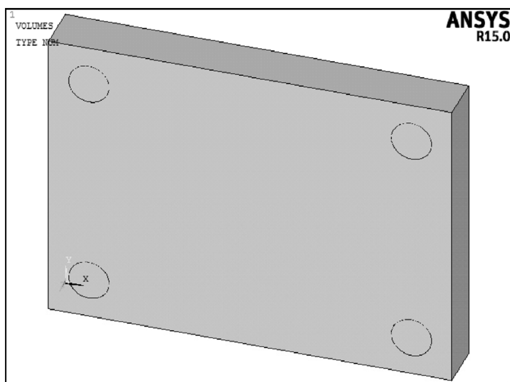


图 2-17　板中央生成圆柱体

（3）从长方体中减去圆柱体

此处运用布尔运算。

路径：Main Menu > Preprocessor > Modeling > Operate >Booleans> Subtract > Volumes。

首先拾取长方体，选择体单元 1，单击 OK 按钮。拾取要减去的圆柱体，单击 OK 按钮，生成带孔的板如图 2-18 所示，平面视图如图 2-19 所示。

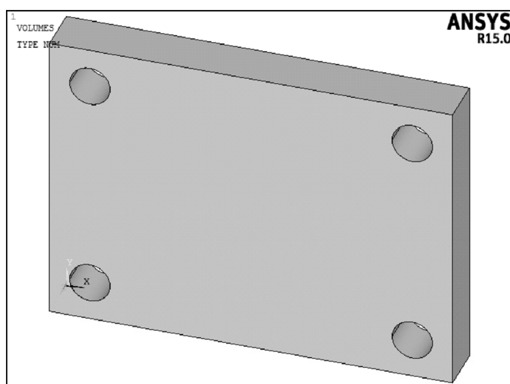


图 2-18 生成带孔板件

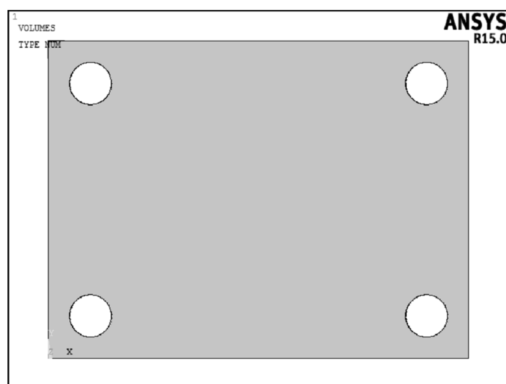


图 2-19 板件平面视图

保存结果为 SAVE_DB，几何模型建立完毕。

提示：本例若用自底向上建模方法，则相对步骤较多。在建模时，根据模型特点，要灵活应用不同的建模思路进行模型的建立。

2.3.3 布尔运算常用命令

在 ANSYS 中，可以通过布尔运算（Booleans）进行几何图形的加减、搭接等操作。

（1）相加（ADD）

相加是指对所有图元进行叠加，包含原始图元的所有部分，生成一个新图元，各个原始图元的公共边界将被清除，形成一个单一的整体。在 ANSYS 的面相加中只能对共面的图元进行操作。

路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add。

（2）搭接（OVERLAP）

搭接是指将分离的同阶图元转变为一个连续体，其中图元的所有重叠区域将独立成为一个图元。搭接与相加操作类似，但相加操作是由几个图元生成一个图元整体，而搭接则是由几个图元生成更多的图元，相交的部分则被分离出来。

路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap。

（3）粘结（GLUE）

粘结操作是将多个图元组合成一个连续体，图元之间仅在公共边界处相连，其公共边界的维数低于原始图元一维。粘结操作与加操作类似，但不同的是这些图元之间仍然相互独立，只是在边界上连接。粘结操作通常还与搭接操作配合使用。

路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue。

简而言之，ADD 是指把两者熔了，重塑一个；GLUE 是指在两者连接处涂胶水，粘

上。OVERLAP 是指在两者相交处新生成“第三者”，原来的各少一块。

2.4 直接建立有限元模型

通常的建模思路是生成几何模型，然后通过划分网格生成有限元模型。不过，对于一些主要由杆系组成的模型，也可以通过建立节点与单元来直接生成有限元模型。现在以一简单的桁架结构说明直接生成有限元模型的方法。桁架有限元模型如图 2-20 所示。

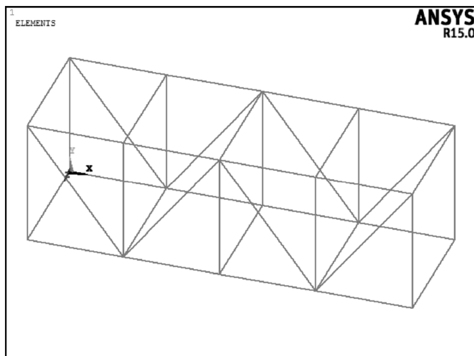


图 2-20 桁架有限元模型

2.4.1 节点的生成

节点的生成类似于关键点的生成，但是二者的本质完全不同。

所谓关键点是几何点，由关键点创建的模型是几何模型，要经过划分网格和赋予属性转化为有限元模型才能进行有限元分析。而节点则是有限元模型的求解点。

生成节点的 GUI 路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS。

在打开的 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框中，第一个输入框用于输入点号，第二排是 X，Y，Z 坐标值，第三排则是 3 个转角值，如图 2-21 所示。

依次输入点及坐标：

点 1（0，0），点 2（3，0），点 3（6，0），点 4（ 9，0），点 5（12，0），

点 6（12，4），点 7（9，4），点 8（6，4），点 9（3，4），点 10（0，4）。

生成节点如图 2-22 所示。

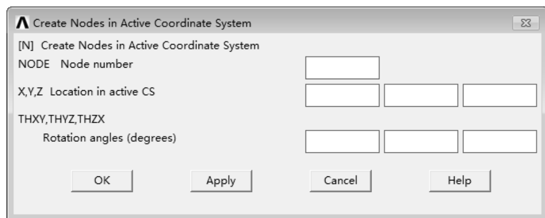


图 2-21 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

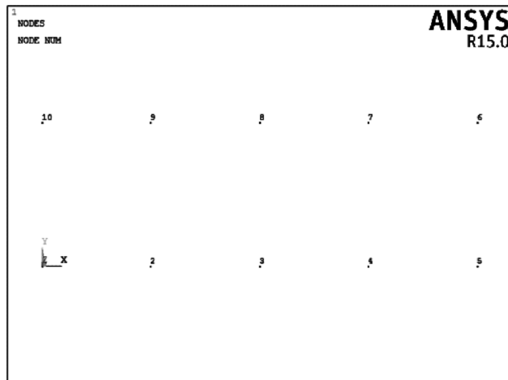


图 2-22 生成的节点

2.4.2 单元的生成

ANSYS 中的单元必须有相应的单元类型以及材料属性。因此在生成单元前先设定其单元类型。

本例采用 LINK180 单元，路径为 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，

接着单击 Add 按钮，选择 Link 3D finit stn 180，如图 2-23 所示。单击 OK 按钮，并退出对话框。

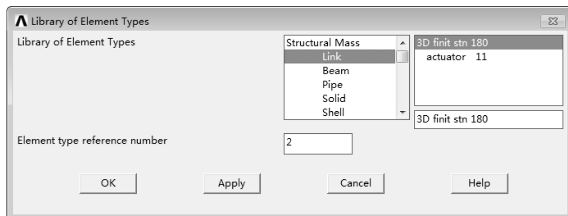


图 2-23 单元库对话框

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 设定模型的材料。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete 设定单元实常数。关于实常数后面的章节会有专题介绍，此处设置杆单元的截面积为 0.002。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes，依次拾取想要连成单元的两个节点，类似于两关键点生成直线的操作。单击 OK 按钮完成每一个单元的生成。

此时，单元所拥有的单元类型以及其他属性就是之前你所设定的类型。生成单元如图 2-24 所示。

通过复制操作生成另一侧的桁架。

路径为 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Elements>Auto Numbered，拾取所有已生成的单元，单击 OK 按钮，在新的对话框中输入 ITIME=2，DZ=4。

单击 OK 按钮，生成两排桁架，并连接桁架间的对应节点，最终得到全套桁架，如图 2-25 所示。

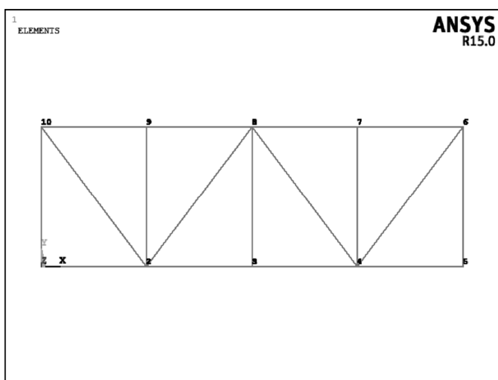


图 2-24 生成单元

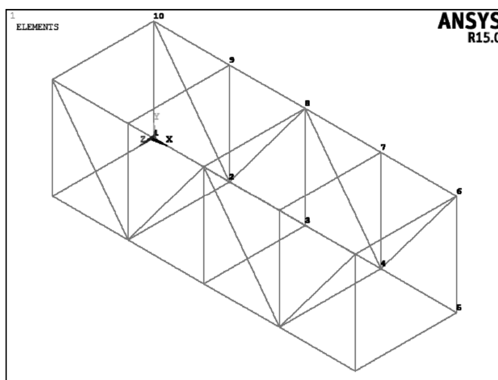
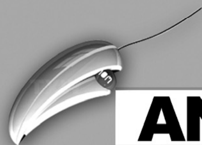


图 2-25 全套桁架

此时，生成的模型即是有限元模型，每一段杆件为一个单元。

2.5 一些快速建模命令

在建立复杂模型时，用传统的方法一点一线的建模效率很低且容易出错。合理应用多功能建模语句，既可以大幅提高工作效率，又能避免人为操作所带来的错误。



2.5.1 复制命令

ANSYS 中可以对既有的几何元素（点、线、面、体）及节点和单元等进行复制操作。在一些有规则的重复性模型中，应用复制命令可以大大提高建模效率。

GUI 路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy。

2.5.2 镜像命令

ANSYS 中提供了镜像功能，可将已存在的模型相对于选中的坐标轴镜像生成对称的另一边的模型。

GUI 路径：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect。

2.5.3 对象的选择与删除

在做相应操作时，可以通过鼠标直接拾取指定目标。但是在模型复杂时，这种方法并不方便，可以通过要拾取对象的不同属性特征进行拾取。

路径：Utility Menu>Select>Entities。

在弹出如图 2-26 所示的对话框中，可以设置选择对象，如图 2-27 所示，包括关键点、线、面、体、单元、节点。选择的方式更为丰富，如图 2-28 所示。



图 2-26　Select Entities 对话框

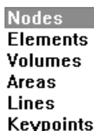


图 2-27　拾取对象



图 2-28　拾取方式

删除命令的路径为 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete。

2.6　CAD 几何模型导入

实际应用中，有很多方便的绘图建模软件。ANSYS 的建模功能有时无法满足现实需要，尤其是建立复杂的几何模型时，不如其他 CAD 软件方便和准确。读者可以在 CAD 软件中建立几何模型，然后把几何模型导入 ANSYS 进行分析。本节将介绍 CAD 图形的导入。

ANSYS 提供了各种 CAD 软件的直接接口和中性几何文件接口，用于导入各种 CAD 软件建立的几何模型。

如图 2-29 所示，执行 Utility menu>File>Import，出现 ANSYS 导入 CAD 几何模型的子菜单，其中的各项则代表用于导入对应文件类型的 CAD 几何模型。

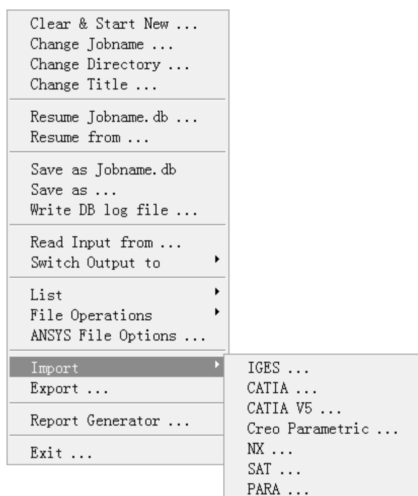


图 2-29　导入 CAD 图形

常用的各种 CAD 软件、文件类型和 ANSYS 接口的对应关系如表 2-1 所示。

表 2-1　CAD 软件、文件类型和 ANSYS 接口的对应关系

CAD 软件	文 件 类 型	ANSYS 接口
CATIA 4.X 及低版本	.model 或.dlv	CATIA
CATIA 5.X	.CATPart 或.CATProduct	CATIA V5
Pro/ENGINEER	.prt	Pro/ENGINEER
Unigraphics	.prt	Unigraphics
Parasolid	.x_t 或.xmt_txt	Parasolid
Solid Edge	.x_t 或.xmt_txt	Parasolid
SolidWorks	.x_t	Parasolid
Unigraphics	.x_t 或.xmt_txt	Parasolid
AutoCAD	.sat	SAT
Mechanical Desktop	.sat	SAT
SAT	.sat	SAT
Solid Designer	.sat	SAT

以 AutoCAD 为例，可以充分利用 AutoCAD 强大的绘图功能，在 AutoCAD 中建立模型后，再输入 ANSYS 中进行计算。AutoCAD 建立的模型可以通过以下两种方法传入 ANSYS。

（1）对于三维实体（3D Object）

AutoCAD: File --> Export... -->保存类型选 ACIS（*.sat） -->输入文件名 -->选实体。

Ansys: File --> Import --> SAT... 输入即可。

优点：用 SAT 文件转换方便，而且一般不会有转换问题。

缺点：只能转换三维实体或面域。

（2）用 iges 格式文件交换

AutoCAD 12 自带输出 iges 格式文件工具，其他可通过 Algor 然后再转入。

Ansys: File --> Import --> SAT... 输入即可。

优点：各种实体类型都能转换。

另外，随着 ANSYS 软件应用的增加，纯粹的用于 CAD 模型导入 ANSYS 的第三方软件应运而生，用户可根据需要自行选择工具软件，直接进行几何模型的导入。

优点： 常用的非三维实体都能转换。

缺点：转换实体类型较少。

2.7 本章小结

本章为读者介绍了在 ANSYS 中建立几何模型的几种不同的方法。

ANSYS 程序提供了两种实体建模方法：自顶向下与自底向上。自顶向下进行实体建模时，用户定义一个模型的最高级图元，如球、棱柱，称为基元，程序则自动定义相关的面、线及关键点。用户利用这些高级图元直接构造几何模型，如二维的圆和矩形以及三维的块、球、锥和柱。

ANSYS 还可以直接建立有限元模型。这种方法可以省去建立几何模型和划分网格等工作，提高效率。

用户可以通过直接在 ANSYS 建立模型或从 CAD 软件导入的方式获得模型。



第 3 章　单元与单元的控制

几何模型需要进行离散化的过程，即划分网格生成单元，才能进行分析计算。合理的网格划分既可以提高计算效率，也可以提供可接受的结果精确度。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 常用单元类型。
- 学习定义单元属性。
- 掌握网格参数的控制。
- 学习划分生成网格。

3.1　ANSYS 单元介绍

ANSYS 中的单元按照其应用的场合可分为结构单元、热单元、电磁单元、耦合场单元、流体单元、网格划分辅助单元、LS-DYNA 单元。按照其可用的维度可分为平面单元（二维）、空间单元（三维）。

每种单元都属于自己的唯一的编号，如常用的 LINK180 即 180 号单元，SOLID65 即 65 号单元。

3.1.1　结构单元

ANSYS 大多数单元为结构单元，用户应根据不同的使用需要选择不同的单元。选择单元应注意以下原则。

- 在结构分析中，结构的应力状态决定单元类型的选择。
- 选择维数最低的单元去获得预期的结果（尽量做到能选择点而不选择线，能选择线而不选择平面，能选择平面而不选择壳，能选择壳而不选择三维实体）。
- 对于复杂结构，应当考虑建立两个或者更多的不同复杂程度的模型。可以建立简单模型，对结构承载状态或采用不同分析选项作实验性探讨。

结构单元根据其特性进行分类，可以分为杆单元、梁单元、管单元、平面实体单元、空间实体单元、壳单元、弹簧单元、质量单元、接触单元、矩阵单元、表面效应单元、黏弹实体单元、超弹实体单元、耦合场单元、界面单元和显式动力分析单元。

（1）杆单元

杆单元用于弹簧、螺杆、预应力螺杆和薄膜桁架等模型。常用的杆单元有 LINK8、LINK11、LINK180 等。

如 LINK8、LINK10 等单元在 ANSYS 15.0 的 GUI 界面已经不支持，但使用 APDL 命令仍然可以调用。现在对最常用的 LINK180 单元进行详细介绍。

LINK180 是一个适用于各类工程应用的三维杆单元，如图 3-1 所示。根据具体情况，该单元可以被看做桁架单元、索单元、链杆单元或弹簧单元等。本单元是一个轴向拉伸-压缩单元，每个节点有 3 个自由度：节点坐标系的 X、Y、Z 方向的平动。

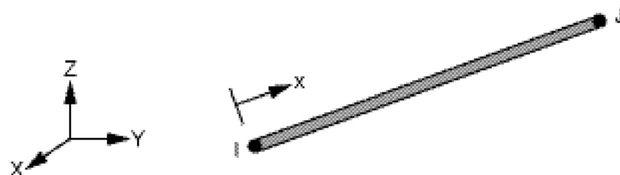


图 3-1　LINK180 示意图

本单元是一种顶端铰接结构，不考虑单元弯曲。本单元具有塑性、蠕变、旋转、大变形和大应变功能。默认时，当考虑大变形时（NLGEOM，ON）任何分析中 LINK180 单元都包括应力刚化选项。

本单元支持弹性、各向同性强化塑性、随动强化塑性、Hill 各向异性强化、Chaboche 非线性强化塑性和蠕变。与本单元类似的一个仅拉伸或仅压缩的单元是 LINK10。

LINK180 单元的输入参数选项如下。

节点：I，J。

自由度：UX、UY、UZ。

实常数：AREA 为截面积，ADDMAS 为质量，TENSKEY 为拉压选项，0 为可以受拉压，1 为只受拉，-1 为只受压。

材料属性：EX，（PRXY 或 NUXY），ALPX（CTEX 或 THSX），DENS，GXY，ALPD，BETD。

面荷载：无。

体荷载：温度 T（I）、T（J）。

特殊属性：单元生死、初始状态、大挠度、大应变、线性扰动、非线性稳定、塑性、应力刚化、用户定义材料、粘弹性、粘弹性/蠕变。

LINK180 的输出参数及控制选项如表 3-1 所示。

表 3-1　LINK180 的输出参数及控制选项

名　称	定　义	O	R
EL	单元编号	Y	Y
NODES	节点编号	Y	Y
MAT	材料编号	Y	Y
REAL	实常数编号	Y	Y
XC，YC，ZC	中心点	Y	1
TEMP	温度	Y	Y
AREA	截面积	Y	Y
FORCE	单元坐标系中的力分量	Y	Y
Sxx	轴向应力	Y	Y
EPELxx	轴向弹性应变	Y	Y

（续）

名　称	定　义	O	R
EPTOxx	总应变	Y	Y
EPEQ	塑料等效应变		
Cur.Yld.Flag	当前屈服标志		
Plwk	塑性应变能密度		
Pressure	静水压		
Creq	蠕变等效应变		
Crwk_Creep	蠕变应变能密度		
EPPLxx	轴向塑性应变		
EPCRxx	轴向蠕变		
EPTHxx	轴向热应变		

以上 3 种杆单元中，LINK8 为常用的杆单元，LINK10 常用于模拟缆绳及间隙，LINK180 则可以考虑粘弹塑性。

（2）梁单元

梁单元用于螺栓（杆），薄壁管件，C 形截面构件，角钢或者狭长薄膜构件（只有膜应力和弯应力的情况）等模型。

梁单元有弹性梁、塑性梁、渐变不对称梁、薄壁梁等。此处详细介绍 BEAM188 单元。

BEAM188 单元是三维线性有限应变梁单元。

BEAM188 单元适合于分析从细长到中等粗短的梁结构，该单元基于铁木辛哥梁结构理论，并考虑了剪切变形的影响。

BEAM188 是三维线性（2 节点）或者二次梁单元。每个节点有 6 个或者 7 个自由度，自由度的个数取决于 KEYOPT（1）的值。当 KEYOPT(1)＝0（默认）时，每个节点有 6 个自由度，即节点坐标系的 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动；当 KEYOPT(1)=1 时，每个节点有 7 个自由度，这时引入了第 7 个自由度（横截面的翘曲）。这个单元非常适合线性、大角度转动和/并非线性大应变问题。

当 NLGEOM 打开的时候，BEAM188 的应力刚化在任何分析中都是默认项。应力强化选项使本单元能分析弯曲、横向及扭转稳定问题（用弧长法分析特征值屈曲和塌陷）。

BEAM188/ BEAM189 可以采用 SECTYPE、SECDATA、SECOFFSETt、SECWRITE 及 SECREAD 定义横截面。本单元支持弹性、蠕变及素性模型（不考虑横截面子模型）。这种单元类型的截面可以是不同材料组成的组和截面。

BEAM188 从 ANSYS 6.0 版本开始忽略任何实参数，参考 SECCONTROLS 命令来定义横向剪切刚度和附加质量。

单元坐标系统与 BEAM188 单元无关。BEAM188 单元的示意图如图 3-2 所示。

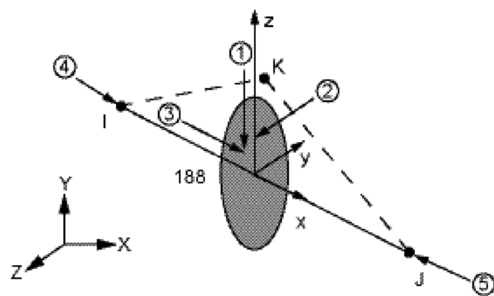


图 3-2　BEAM188 单元示意图

BEAM188/BEAM189 单元可以用在细长或者短粗的梁。由于一阶剪切变形的限制，只有适

度的“粗”梁可以分析。梁的长细比（$GAL^2/(EI)$）可以用来判定单元的适用性，其中，G 为剪切模量，A 为截面积，L 为长度，EI 为抗弯刚度。推荐长细比要大于 30。

BEAM188/BEAM189 的在一些截面点的截面相关量（积分面积、位置、泊松比、函数倒数等）通过用 SECTYPE 和 SECDATA 命令自动计算得到。每个截面假定是由一系列预先决定的 9 节点元组合而成。图 3-3 所示为矩形截面和槽型截面。每个截面单元有 4 个积分点，每个可能与独立的材料种类相关联。

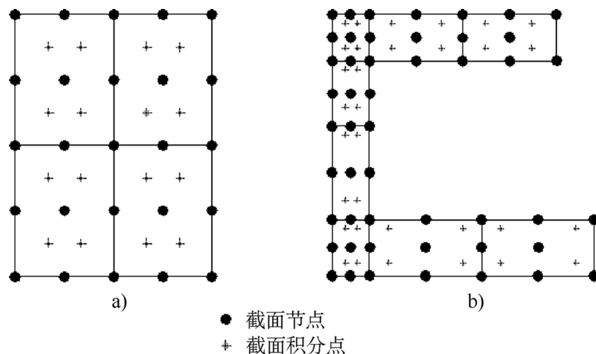


图 3-3　BEAM188 单元的矩形截面与槽形截面

a) 矩形截面　b) 槽形截面

使用 SECTYPE 命令可以定义多种截面类型。如图 3-4 所示为不同的梁截面类型。

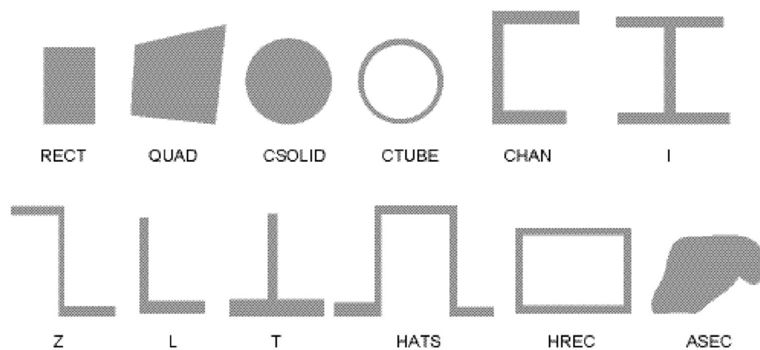


图 3-4　不同的截面类型

（3）管单元

管单元是一类轴向拉压、弯、扭的空间单元，每个节点均有 6 个自由度。此类单元以梁单元为基础，包含了对称性和标准管几何尺寸的简化特性。

PIPE16 是一个轴向拉压、扭转和弯曲单元，单元的每个节点有 6 个自由度：沿节点坐标系的 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动。本单元以三维梁单元（BEAM4）为基础，并包含了用于处理管的对称性和标准管几何尺寸的专用特性，如图 3-5 所示。

PIPE17 是 3 个单轴直管单元（PIPE16）组合成的 T 形管单元，具有拉压、扭转和弯曲功能，单元的每个节点有 6 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动，如图 3-6 所示。PIPE17 包含 T 形接头弹性选项、应力增强系数选项和打印单元力

选项。该单元还考虑了绝热、内部流体和腐蚀。

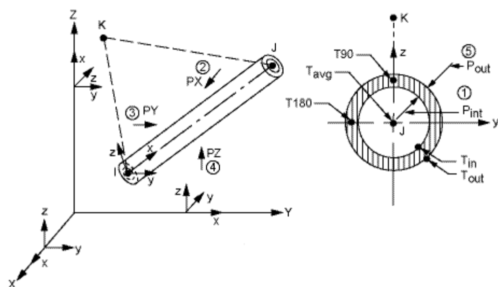


图 3-5　PIPE16 单元

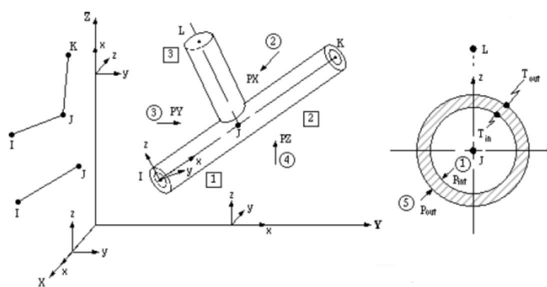


图 3-6　PIPE17 单元

PIPE18 是具有拉、压、扭转和弯曲性能的环形单轴单元。每个节点有 6 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动，如图 3-7 所示。单元选项中包括多种弹性和应力强化系数。该单元还考虑了绝热、内部流体和腐蚀。

PIPE20 是具有拉压、弯曲和扭转性能的单轴单元。该单元的每个节点有 6 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动，如图 3-8 所示。该单元具有塑性、蠕变、膨胀功能。若不考虑以上这些影响，可以选用弹性管单元 PIPE16。

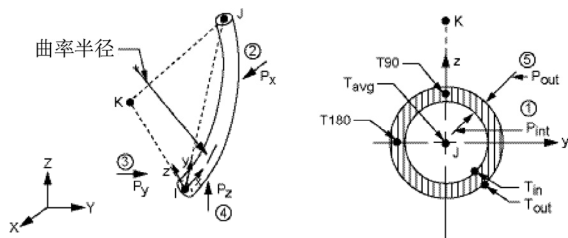


图 3-7　PIPE18 单元

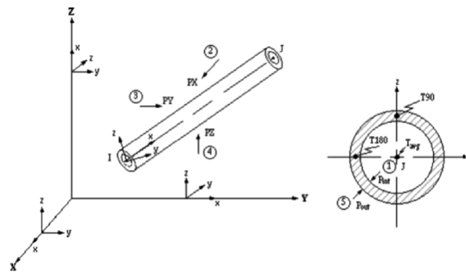


图 3-8　PIPE20 单元

PIPE59 是具有拉伸-压缩、扭转和弯曲功能，并有薄膜力以模拟海洋波浪和电流作用的单轴单元。该单元每个节点有 6 个自由度：节点坐标系的 X、Y、Z 向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动，如图 3-9 所示。除了荷载包括水的动力和浮力的影响，以及质量包括水和管内部件的附加质量之外，本单元的其他特性与 PIPE16 类似。该单元还有电缆选项（与 LINK8 类似），应力刚化和大挠度功能。

PIPE60 是具有拉伸-压缩、弯曲和扭转功能的单轴单元。该单元每个节点有 6 个自由度：节点坐标系的 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动，如图 3-10 所示。该单元具有塑性、蠕变和膨胀功能。如果不需要这些性能，可以用弹性弯管单元 PIPE18。可以选用包括挠度系数和在单元坐标系内输出作用在单元上的力和弯矩等选项。

以上几种单元是 ANSYS 15.0 中作为存档的旧功能提供有限支持的单元类型，只能在 APDL 命令流中调用。但在工程实际中，由于这些单元简洁实用，仍有广泛应用。

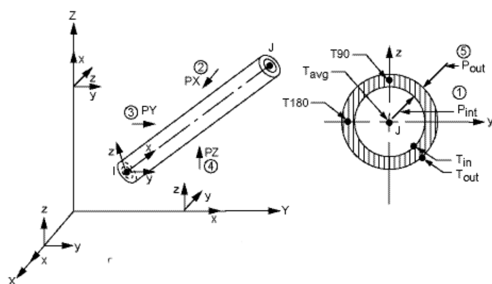


图 3-9　PIPE59 单元

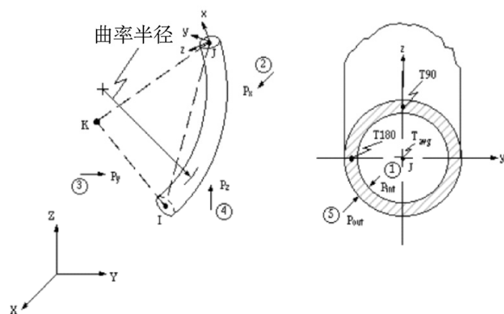


图 3-10　PIPE60 单元

（4）平面实体单元

平面实体单元是一类非常重要、用途广泛的单元类型。熟练运用平面单元可以将空间问题简化到平面上解决，极大地方便计算，节约时间。

ANSYS 提供了大量平面单元，如理论学习中最常见的示例二次三角形单元 PLANE2、二次四边形单元 PLANE82 等。新的平面如 PLANE182、PLANE183 等。

PLANE182 用于二维实体结构建模。本单元即可用作平面单元（平面应力、平面应变或广义平面应变），也可作为轴对称单元。

本单元有 4 个节点，每个节点 2 个自由度：节点 X 和 Y 方向的平移。本单元具有塑性、超弹性、应力刚度、大变形和大应变能力。并具有力-位移混合公式的能力，可以模拟接近不可压缩的弹塑性材料和完全不可压缩超弹性材料的变形。

在图 3-11 中给出了本单元的几何形状，节点位置和坐标系。单元输入数据包括 4 个节点，一个厚度（仅对平面应力选项）以及正交异性材料特性。单元坐标系的默认方向与总体直角坐标系相同。可以用 ESYS 命令定义单元坐标系，它确定了正交异性材料的方向。

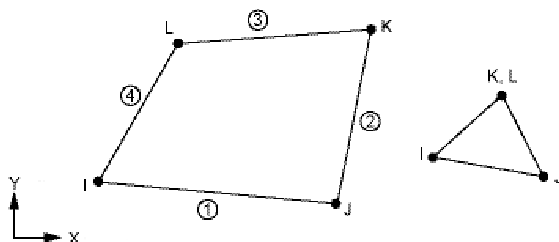


图 3-11　PLANE182 几何形状

对平面问题，除了 KEYOPT(3)=3 或 KEYOPT(3)=5 的情况外，本单元如有节点力，应输入厚度方向每单位长度的力值；对轴对称问题应输入整个圆周（360°）的力值。

KEYOPT(3)=5 用于确立广义应变能力。关于广义平面应变选项的更多信息见 ANSYS 单元手册中的 18x 实体单元的广义平面应变选项。KEYOPT(6)=1 设置单元形状函数为位移-力混合公式。关于使用混合公式的更多细节，见 ANSYS 单元手册中的位移-力混合公式的应用。

用 ISTRESS 或 ISFILE 命令可以对本单元施加一个初始应力状态。也可以设置 KEYOPT(10)= 1，从用户子程序 USTRESS 中读入初始应力。

本单元自动包括压力荷载刚度效应。如果要求非对称的压力荷载刚度效应矩阵，使用命令 NROPT，UNSYM。



PLANE182 单元输入参数如下。

节点：I、J、K、L。

自由度：UX、UY。

实常数：THK 为厚度（仅用于 KEYOPT(3)= 3）；HGSTF 为沙漏刚度比例因子（仅用于 KEYOPT(1)= 1），默认为 1.0（如果输入 0.0、使用默认值）。

材料性能：EX、EY、EZ、PRXY、PRYZ、PRXZ（或 NUXY、NUYZ、NUXZ）、ALPX、ALPY、ALPZ（或 CTEX、CTEY、CTEZ 或 THSX、THSY、THSZ）、DENS、GXY、GYZ、GXZ、DAMP。

面荷载：压力。

体荷载：温度。

求解能力：塑性、超弹性、粘弹性、粘塑性、蠕变、应力刚度、大变形、大应变、初应力输入、单元技术自动选择、生死单元。

支持用 TB 命令输入下列类型的数据表：ANEL、BISO、MISO、NLISO、BKIN、MKIN、KINH、CHABOCHE、HILL、RATE、CREEP、HYPER、PRONY、SHIFT、CAST、SMA 和 USER。

Key Option 选项整理如下。

KEYOPT(1) – 单元技术：

0——使用 B-bar 方法的全积分。

1——由沙漏控制的均匀减缩积分。

2——增强的应变公式。

3——简化的增强应变公式。

KEYOPT(3) – 单元特性：

0——平面应力。

1——轴对称。

2——平面应变（Z 向应变为 0.0）。

3——有厚度输入的平面应力。

5——广义平面应变。

KEYOPT(6) – 单元公式：

0——纯位移公式（默认）。

1——使用位移/力（U/P）混合公式（对平面应力无效）。

KEYOPT(10) – 用户定义初始应力：

0——不使用子程序提供初始应力（默认）。

1——由 USTRESS 子程序读入初始应力。

PLANE182 单元输出方向如图 3-12 所示。

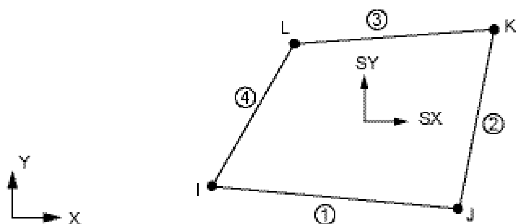


图 3-12 PLANE182 单元输出方向

PLANE182 输出的详细参数如表 3-2 所示。

表 3-2 PLANE182 输出详细参数

名 称	定 义	O	R
EL	单元号	—	Y
NODES	节点：I，J，K，L	—	Y
MAT	材料号	—	Y
THICK	平均厚度	—	Y
VOLU	体积	—	Y
XC，YC	结果输出点位置	Y	3
PRES	压力	—	Y
TEMP	温度 T（I），T（J），T（K），T（L）	—	Y
S：X、Y、Z，XY	应力（对平面应力单元 SZ = 0.0）	Y	Y
S：1，2，3	主应力	—	Y
S：INT	应力强度	—	Y
S：EQV	当量应力	Y	Y
EPEL：X、Y、Z，XY	弹性应变	Y	Y
EPEL：1，2，3	弹性主应变	—	Y
EPEL：EQV	当量弹性应变 [6]	Y	Y
EPTH：X、Y、Z，XY	热应变	2	2
EPTH：EQV	当量热应变 [6]	2	2
EPPL：X、Y、Z，XY	塑性应变 [7]	1	1
EPPL：EQV	当量塑性应变 [6]	1	1
EPCR：X、Y、Z，XY	蠕变应变	1	1
EPCR：EQV	当量蠕变应变 [6]	1	1
EPTO：X、Y、Z，XY	总工程应变（EPEL + EPPL + EPCR）	Y	—
EPTO：EQV	总当量工程应变（EPEL + EPPL + EPCR）	Y	—
NL：EPEQ	累积的当量塑性应变	1	1
NL：CREQ	累积的当量蠕变应变	1	1
NL：SRAT	塑性屈服（1 = 进入屈服，0 = 未屈服）	1	1
NL：PLWK	塑性功	1	1
NL：HPRES	静水压力	1	1
SEND：ELASTIC，PLASTIC，CREEP	应变能密度	—	1

（续）

名　称	定　义	O	R
LOCI：X、Y、Z	积分点位置	—	4
SVAR：1，2，...，N	状态变量	—	5

PLANE183 是一个高阶二维 8 节点单元。PLANE183 具有二次位移函数，能够很好地适应不规则模型的划分（如由不同 CAD/CAM 所产生的模型），如图 3-13 所示。

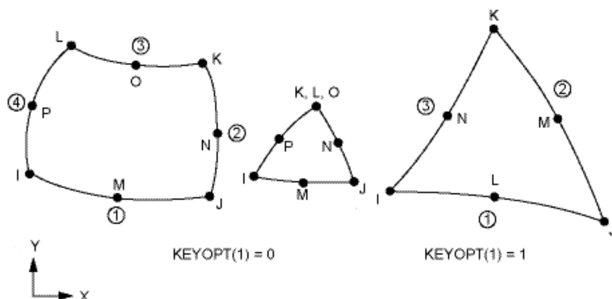


图 3-13　PLANE183 单元的几何形状

本单元有 8 个节点，每个节点有 2 个自由度，分别为 X 和 Y 方向的平移。本单元既可用作平面单元（平面应力、平面应变和广义平面应变），也可用作轴对称单元。本单元具有塑性、蠕变、应力刚度、大变形及大应变的能力，还具有力-位移混合公式的能力，可以模拟接近不可压缩的弹塑性材料的变形。支持初应力选项。

PLANE183 单元的输入参数如下。

节点：I，J，K，L，M，N，O，P。

自由度：UX，UY。

实常数：如果 KEYOPT(3)= 0，1 或 2，没有实常数；THK 为厚度（当 KEYOPT(3) = 3）。

材料性能：EX，EY，EZ，PRXY，PRYZ，PRXZ（或 NUXY，NUYZ，NUXZ），ALPX，ALPY，ALPZ（或 CTEX，CTEY，CTEZ 或 THSX，THSY，THSZ），DENS，GXY，GYZ，GXZ，DAMP。

面荷载：压力。

体荷载：温度。

求解能力：塑性、超弹性、粘弹性、粘塑性、蠕变、应力刚度、大变形、大应变、初应力输入、单元技术自动选择、生死单元。

支持用 TB 命令输入下列类型的数据表：ANEL，BISO，MISO，NLISO，BKIN，MKIN，KINH，CHABOCHE，HILL，RATE，CREEP，HYPER，PRONY，SHIFT，CAST，SMA 和 USER。

KEYOPT(3) - 单元特性：

0——平面应力。

1——轴对称。

2——平面应变（Z 向应变为 0.0）。

3——有厚度输入的平面应力。

5——广义平面应变。

KEYOPT(6) - 单元公式：

0——纯位移公式（默认）。

1——使用位移/力（U/P）混合公式（对平面应力无效）。

KEYOPT(10) - 用户定义初始应力：

0——不使用子程序提供初始应力（默认）。

1——由 USTRESS 子程序读入初始应力。

PLANE183 单元的输出方向如图 3-14 所示。

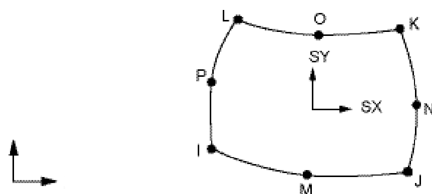


图 3-14　PLANE183 单元的输出方向

PLANE183 详细的输出参数及控制如表 3-3 所示。

表 3-3　PLANE183 详细的输出参数及控制

名　　称	定　　义	O	R
EL	单元号	—	Y
NODES	节点：I，J，K，L	—	Y
MAT	材料号	—	Y
THICK	平均厚度	—	Y
VOLU	体积	—	Y
XC，YC	结果输出点位置	Y	3
PRES	压力	—	Y
TEMP	温度 T（I），T（J），T（K），T（L）	—	Y
S：X、Y、Z，XY	应力（对平面应力单元 SZ = 0.0）	Y	Y
S：1，2，3	主应力	—	Y
S：INT	应力强度	—	Y
S：EQV	当量应力	—	Y
EPEL：X、Y、Z，XY	弹性应变	Y	Y
EPEL：1，2，3	弹性主应变	Y	—
EPEL：EQV	当量弹性应变 [7]	—	Y
EPTH：X、Y、Z，XY	热应变	3	3
EPTH：EQV	当量热应变 [7]	—	3
EPPL：X、Y、Z，XY	塑性应变 [8]	1	1
EPPL：EQV	当量塑性应变 [7]	—	1
EPCR：X、Y、Z，XY	蠕变应变	2	2

（续）

名　　称	定　　义	O	R
EPCR：EQV	当量蠕变应变 [7]	2	2
EPTO：X、Y、Z，XY	总工程应变（EPEL＋EPPL＋EPCR）	Y	—
EPTO：EQV	总当量工程应变（EPEL＋EPPL＋EPCR）	Y	—
NL：EPEQ	累积的当量塑性应变	1	1
NL：CREQ	累积的当量蠕变应变	1	1
NL：SRAT	塑性屈服（1＝ 进入屈服，0＝ 未屈服）	1	1
NL：SEPL	节点在应力-应变曲线上的当量应力	1	1
NL：PLWK	塑性功	1	1
NL：HPRES	静水压力	1	1
SEND：ELASTIC，PLASTIC，CREEP	应变能密度	—	1
LOCI：X、Y、Z	积分点位置	—	5
SVAR：1，2，…，N	状态变量	—	6

说明：

1）非线性结果只有在单元为非线性材料时输出。

2）仅当单元有蠕变荷载时输出。

3）仅当单元有热荷载时输出。

4）仅用于*GET 命令，给出单元中心处结果。

5）仅在使用 OUTRES，LOCI 时可用。

6）仅在使用 USERMAT 子程序和 TB，STATE 命令时可用。

7）当量应变使用有效泊松比：对于弹性和热问题，该值由用户给出（MP，PRXY 命令）；对于塑性和蠕变问题，该值为 0.5。

8）对于形状记忆合金材料模型，转换应变作为塑性应变 EPPL 输出。

PLANE183 单元的面积必须是正的；本单元必须位于总体坐标的 X-Y 平面中，对于轴对称分析 Y 轴必须是对称轴，轴对称结构建模必须满足 X≥0；如果删除某边的中间节点，就意味着沿该边的位移成为线性变化的。

（5）空间实体单元

空间实体单元（SOLID）是进行任何有限元分析都非常常用的单元。实际工程经常会遇到复杂结构，无法用线、面进行简化时，只能采用实际模型计算。有时为计算结果直观，时间允许的话也经常采用空间实体单元。

常用的空间实体单元有 SOLID65、SOLID185、SOLID186 等。

SOLID65 单元用于含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。该实体模型可具有拉裂与压碎的性能。在混凝土的应用方面，如用单元的实体性能来模拟混凝土，而用加筋性能来模拟钢筋的作用。当然该单元也可用于其他方面，如加筋复合材料（如玻璃纤维）及地质材料（如岩石）。该单元具有 8 个节点，每个节点有 3 个自由度，即 X，Y，Z 3 个方向的线位移；还可对 3 个方向的含筋情况进行定义。

本单元与 SOLID45 单元（三维结构实体单元）的相似，只是增加了描述开裂与压碎的性能。本单元最重要的方面在于其对材料非线性的处理。其可模拟混凝土的开裂（3 个正交

方向)、压碎、塑性变形及渐变，还可模拟钢筋的拉伸、压缩、塑性变形及蠕变，但不能模拟钢筋的剪切性能。

关于 SOLID65 单元几何图形、节点位置、单元坐标系如图 3-15 所示。单元性质为 8 节点各向同性材料，单元包括 1 种实体材料和 3 种钢筋材料，用命令 MAT 输入对混凝土材料的定义，而有关钢筋的细则需在实常数中定义，包括材料号、体积率、方向角（THETA，PHI），钢筋的方向角可通过命令/Eshape 以图示方式校验。

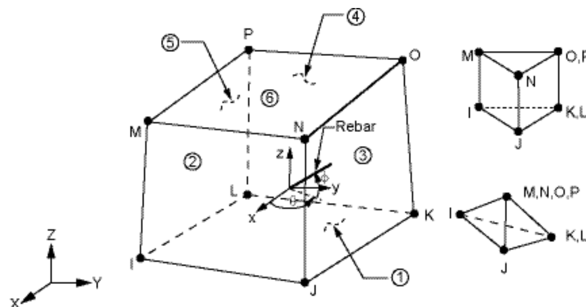


图 3-15　SOLID65 单元几何特性

体积率是指钢筋的体积与整个单元体积的比，钢筋的方向通过单元坐标系中的两个角度（度制）来定义。当钢筋的材料号为 0 或等于单元的材料号时则不考虑它的作用。

另外，有关混凝土的材料定义，如剪切传递系数、拉应力、压应力都应在数据表中给出，详细描述见表“SOLID65 混凝土材料数据表”。通常剪力传递系数为 0～1.0，0 表示平滑的裂缝（完全丧失剪力传递作用），1 表示粗糙的裂缝（几乎没有失去剪力传递作用）。这就有利于对裂缝开裂与闭合进行描述。

有关单元荷载的描述见“节点单元荷载”（ANSYS 帮助中专有一节）。压力作为面荷载作用在单元表面如“SOLID65 的几何模型图”中带圈数字所示。主动力作用在单元内。温度和影响（fluences）可在节点上作为单元体荷载输入。节点 I 的温度 T(I)默认为 TUNIF，如其他节点温度没有被指定，则它们默认为 T(I)。对于其他的输入模型未指定温度时默认值都为 TUNIF。对影响（fluence）的设定除用 0 取代 TUNIF 外与温度的设定是相同的。

用命令 TREF 和 BETAD 分别用来设定整体的基准温度和阻尼值。用 MAT 命令指定与单元相关的基准温度值（MP，REFT）或阻尼值（MP，DAMP），但不能对钢筋的材料号进行以上定义。

KEYOPT(1)用于设定是否考虑大变形，KEYOPT(5)和 KEYOPT(6)则提供是多种单元输出选项（详见单元解答）。

KEYOPT(7)是与是否考虑应力松弛相关的项，当 KEYOPT＝1 时表示考虑，目的是加速裂缝即将开裂时计算的收敛（在混凝土材料数据表的第 9 个系数中的输入值即为拉伸应力松弛的折减系数）。应力松弛并不能反映因为次生裂缝的产生而引起的应力应变关系的变化。松弛系数在裂缝处为零，因此，相应的开裂面上的刚度也是零。

在几何非线性分析时可用“SOLCONTROL,,, INCP”命令设定考虑抗压刚度的影响。抗压刚度的影响在线性屈曲分析中会被自动考虑。

SOLD65 单元输入总结如下。

节点：I，J，K，L，M，N，O，P。

自由度：UX，UY，UZ。

实常数：MAT1，VR1，THETA1，PHI1，MAT2，VR2，THETA2，PHI2，MAT3，VR3，THETA3，PHI3。

（这里的 MATn 是材料号，VRn 是体积率，而 THETAn 和 PHIn 方向角，代表了 3 种钢筋材料。）

材料性质：EX，ALPX，PRXY 或 NUXY，DENS（用于混凝土）EX，ALPX，DENS（用于每种钢筋）。

还可通过 MAT 命令设定阻尼与基准温度。

表面荷载：压力——面 1（J-I-L-K），面 2（I-J-N-M），面 3（J-K-O-N），面 4（K-L-P-O），面 5（L-I-M-P），面 6（M-N-O-P）。

体荷载：温度——T(I)，T(J)，T(K)，T(L)，T(M)，T(N)，T(O)，T(P)

影响（Fluences）—— FL(I)，FL(J)，FL(K)，FL(L)，FL(M)，FL(N)，FL(O)，FL(P)。

特性：Plasticity（塑性），Creep（蠕变\徐变），Cracking（开裂），Crushing（压碎），Large deflection（大变形），Large strain（大应变），Stress stiffening（应力强化），Birth and death（单元生死），Adaptive descent。

KEYOPT(1) 大变形控制：

0——考虑大变形；1——不考虑。

KEYOPT(5) 混凝土线性解的输出控制：

0——只打印质心的线性解；1——给出每个积分点的解；2——输出节点应力。

KEYOPT(6) 混凝土非线性解输出控制：

0——只打印质心的线性解；3——同时还给出积分点的解。

KEYOPT(7) 开裂后应力松弛考虑选项：

0——不考虑拉伸应力松弛；1——考虑应力松弛，有助于计算收敛。

SOLID65 应力输出项。

SOLID65 单元输出示意如图 3-16 所示。

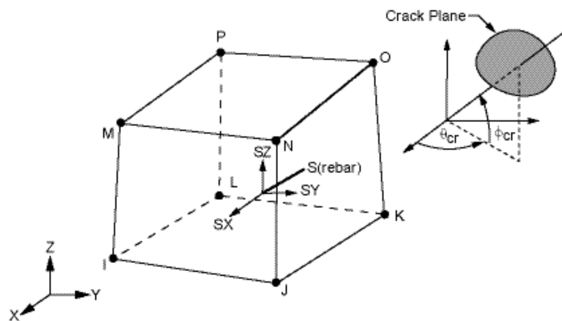


图 3-16　SOLID65 单元输出示意

与单元相关的解答输出项有以下两方面：

1）所有节点的节点位移。

2）其他输出项如表 3-4 所示。

表 3-4　附加单元输出

名　称	定　义	O	R
EL	单元号	Y	Y
NODES	节点：I，J，K，L，M，N，O，P	Y	Y
MAT	材料号	Y	Y
NREINF	钢筋数量	Y	—
VOLU:	体积	Y	Y
PRES	压力作用面 P1 由节点 J，I，L，K 围成；P2 由 I，J，N，M 围成；P3 由 J，K，O，N 围成；P4 由 K，L，P，O 围成；P5 由 L，I，M，P 围成；P6 由 M，N，O，P 围成。	Y	Y
TEMP	作用在各节点上的温度 T(I)，T(J)，T(K)，T(L)，T(M)，T(N)，T(O)，T(P)	Y	Y
FLUEN	作用在各节点上的影响 FL(I)，FL(J)，FL(K)，FL(L)，FL(M)，FL(N)，FL(O)，FL(P)	Y	Y
XC，YC，ZC	Location where results are reported		
S:X，Y，Z，XY，YZ，XZ	应力		
S:1，2，3	主应力		
S:INT	应力强度		
S:EQV	等效应力		
EPEL:X，Y，Z，XY，YZ，XZ	弹性应变		
EPEL:1，2，3	弹性主应变		
EPEL:EQV	等效弹性应变		
EPTH:X，Y，Z，XY，YZ，XZ	平均热应变		
EPTH:EQV	等效热应变[7]		
EPPL:X，Y，Z，XY，YZ，XZ	塑性应变均值		
EPPL:EQV	等效塑性应变		
EPCR:X，Y，Z，XY，YZ，XZ	蠕变均值		
EPCR:EQV	等效蠕变		
NL:EPEQ	等效塑性应变均值		
NL:SRAT	试验应力与屈服应力的比值		
NL:SEPL	应力应变曲线上的平均等效应力（混凝土的）		
NL:HPRES	静水压力		
THETCR，PHICR	裂缝的方向角 THETA 和 PHI		
STATUS	单元状态		
IRF	钢筋号		
MAT	材料号		
VR	体积率		
THETA	X-Y 平面内的方向角		
PHI	X-Y 平面外的方向角		
EPEL	单轴弹性应变		

（续）

名　　称	定　　义	O	R
S	单轴弹性应力		
EPEL	单轴弹性应变均值		
EPPL	单轴塑性应变均值		
SEPL	应力应变曲线上的平均等效应力（钢筋的）		
EPCR	单轴蠕变均值（钢筋）		

SOLID185 用于建立三维实体结构模型。该单元由 8 个节点定义，每个节点有 3 个自由度：节点坐标系的 X、Y、Z 方向的平动，如图 3-17 所示。本单元具有塑性、超弹性、应力刚化、蠕变、大变形和大应变等功能。该单元具有塑性、超弹、应力刚化、大变形以及大应变等功能。也可利用混合公式模拟几乎或完全不可压超弹材料的变形。

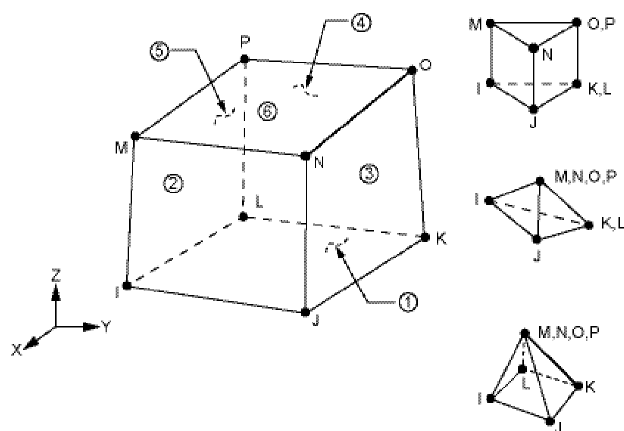


图 3-17　SOLID185 单元几何模型

SOLID185 单元的输入参数如下。

节点：I，J，K，L，M，N，O，P。

自由度：UX，UY，UZ。

实常数：无。

材料属性：EX、EY、EZ、PRXY、PRYZ、PRXZ（NUXY、NUYZ、NUXZ）、GXY、GYZ、GXZ、ALPX、ALPY、ALPZ（CTEX、CTEY、CTEZ 或 THSX、THSY、THSZ）、DENS、ALPD、BETD。

面荷载：压力。

体荷载：温度、体积力密度。

求解能力：单元生死、弹性、单元技术自动选择、超弹性、初应力输入、大变形、大应变、线性扰动、非线性稳定性、塑性、应力刚化、用户自定义材料、粘弹性、粘塑性/蠕变。

SOLID185 单元的输出定义如表 3-5 所示。

表 3-5　SOLID185 输出定义

名　　称	定　　义	O	R
EL	单元编号	—	Y
NODES	节点	—	Y
MAT	材料编号	—	Y
VOLU	体积	—	Y
XC，YC，ZC	结果位置	Y	
PRES	压力	—	Y
TEMP	温度	—	Y
S：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	应力	Y	Y
S：1，2，3	主应力	—	Y
S：INT	应力强度	—	Y
S：EQV	等效应力	—	Y
EPEL：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	弹性应变	Y	Y
EPEL：EQV	等效弹性应变	—	Y
EPTH：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	热应变		
EPTH：EQV	等效热应变		
EPPL：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	塑性应变		
EPPL：EQV	等效塑性应变		
EPCR：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	蠕变应变		
EPCR：EQV	等效蠕变应变		
EPTO：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	全应变	Y	—
EPTO：EQV	等效全应变	Y	—
NL：EPEQ	累计等效塑性应变		
NL：CREQ	累计等效蠕变应变		
NL：SRAT	塑性屈服		
NL：HPRES	静水压力		
SEND：ELASTIC，PLASTIC，CREEP	应变能密度	—	
LOCI：X、Y、Z	集成点位置	—	
SVAR：1，2，…，N	状态变量	—	

如图 3-18 所示为 SOLID185 单元层状结构几何模型，图 3-19 所示为 SOLID185 单元层状结构输出方向示意。

SOLID186 是高阶的三维 20 节点结构实体单元。该单元具有二次位移，适于生成不规则网格模型（如由各种 CAD/CAM 系统生成的模型），如图 3-20 所示。

本单元由 20 个节点定义，每个节点有 3 个自由度：节点坐标系的 X、Y、Z 方向的平动。SOLID186 可具有任意的空间取向，如图 3-21 所示。本单元具有塑性、超弹性、蠕变、应力刚化、大变形和大应变等功能。也可利用混合公式模拟几乎或完全不可压超弹材料的变形。

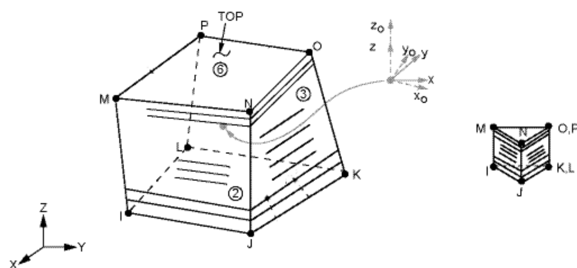


图 3-18 SOLID185 单元层状结构模型

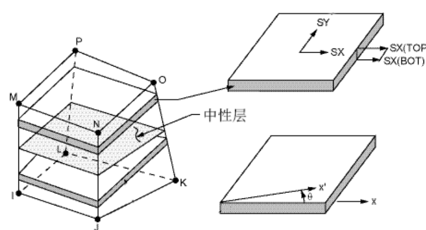


图 3-19 SOLID185 单元层状结构输出

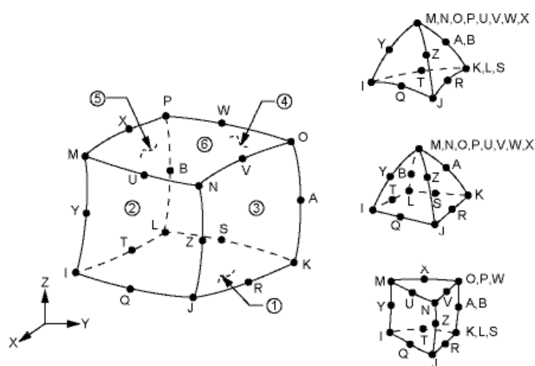


图 3-20 SOLID186 单元几何模型

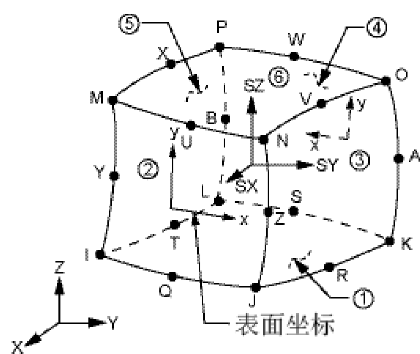


图 3-21 SOLID186 单元输出方向

如表 3-6 所示为 SOLID186 单元输出详细参数与控制。

表 3-6 SOLID186 单元输出定义

名 称	定 义	O	R
EL	单元编号	—	Y
NODES	节点	—	Y
MAT	材料编号	—	Y
VOLU	体积	—	Y
XC，YC，ZC	结果位置	Y	3
PRES	压力	—	Y
TEMP	温度	—	Y
S：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	应力	Y	Y
S：1，2，3	主应力	—	Y
S：INT	应力强度	—	Y
S：EQV	等效应力	—	Y
EPEL：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	弹性应变	Y	Y
EPEL：EQV	等效弹性应变	Y	Y
EPTH：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	热应变		
EPTH：EQV	等效热应变		

（续）

名　　称	定　　义	O	R
EPPL：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	塑性应变		
EPPL：EQV	等效塑性应变		
EPCR：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	蠕变应变		
EPCR：EQV	等效蠕变应变		
EPTO：X、Y、Z，XY，YZ，XZ	全应变	Y	—
EPTO：EQV	等效全应变	Y	—
NL：EPEQ	累计等效塑性应变		
NL：CREQ	累计等效蠕变应变		
NL：SRAT	塑性屈服		
NL：HPRES	静水压力		
SEND：ELASTIC，PLASTIC，CREEP	应变能密度	—	
LOCI：X、Y、Z	集成点位置	—	
SVAR：1，2，…，N	状态变量	—	

（6）壳单元

当结构的总体厚度相对于典型长度很小时可使用壳单元，长度比厚度大 20 倍以上的问题可决定使用壳单元。ANSYS 中的壳单元根据要求解的问题类型采用不同的公式，3 个基本的壳公式包括：薄膜理论、薄壳理论和厚壳理论。SHELL41 采用薄膜理论，忽略弯曲和横向剪切，只包含薄膜效应。SHELL63 是薄壳单元，采用经典 Love-Kirchhoff 理论。SHELL63 包含弯曲和薄膜效应但忽略横向剪切变形。SHELL43、143、181，91，93 和 99 是厚壳单元，采用 Reissner/Mindlin 理论。其包含弯曲、薄膜和横向剪切效应。横向剪切被表示为整个厚度上的常剪切应变，这种一阶近似只适用于中等厚度壳体。

平面内壳的响应可认为是平面应力状态，因此对于壳单元不会出现体积锁定问题。（图 3-22 所示为 SHELL181 单元节点及积分点示意图，图 3-23 所示的 SHELL281 为 SHELL181R 的高阶单元。当绝对不可压缩，泊松比=0.5 时 SHELL181 支持超弹性）。对于薄膜现象，壳单元的平面公式与平面实体单元的公式相似（非协调模式）。SHELL41、43、63 和 181 对于平面内变形支持非协调模式。SHELL181 也支持具有沙漏控制的一致缩减积分（默认选项）。

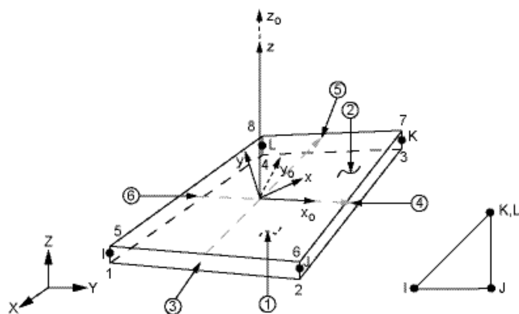


图 3-22　SHELL181

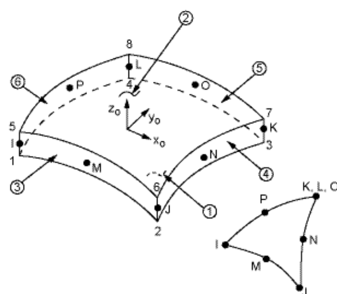


图 3-23　SHELL281

在进行线性分析时，如壳的厚度非常小采用 SHELL63、SHELL63 单元不包含横向剪切效应，如图 3-24 所示。如横向剪切变形重要，对于均匀材料采用 SHELL43、SHELL93 或 SHELL143，对于复合材料采用 SHELL91 或 SHELL99。注意具有一致缩减积分（默认）的单元 SHELL181 对大模型较快，但需要较细的网格。最简单的壳单元如图 3-25 所示，SHELL28 单元是 4 节点，线性壳单元，可以承受剪刀。

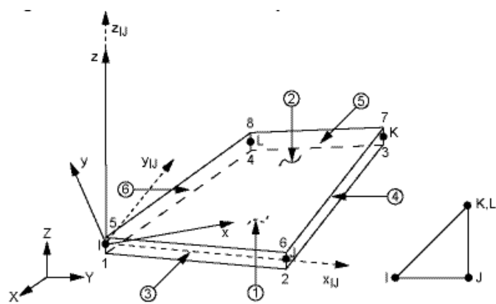


图 3-24　SHELL63

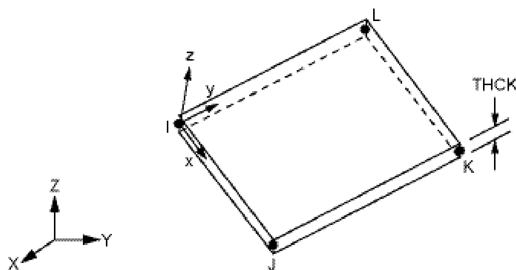


图 3-25　SHELL28

进行非线性分析时，模型具有等向强化塑性和超弹性时，采用 SHELL181。其优势包括：较小的.esav 文件，较少的 CPU 时间，压力荷载刚度效果，可以导入初始应力，厚度变化。若模型具有随动强化塑性或蠕变，采用 SHELL143、SHELL43 和 SHELL93。SHELL143 适用于小应变塑性，SHELL93 是弯曲的壳（高阶）。

（7）弹簧单元

弹簧单元是一类专门模拟弹簧行为的单元，当用于一般弹簧时比较简单。此类型单元主要用于模拟销、铰链、扭簧等的行为，均无面荷载与体荷载。

COMBIN7 是三维销钉（或旋转）铰链单元，可用于在公共点上连接模型的两个或多个部分。单元的功能包括连接柔度（或刚度）、摩擦、阻尼和一定的控制功能。其中重要的一条就是大变形功能，这时局部坐标系固定于连接单元并随之移动。本单元适用于运动学静力分析和运动学动力分析。

COMBIN14 单元在一维、二维或三维应用中有轴向拉压或扭转的能力。轴向弹簧-阻尼器选项意味着单轴拉压单元，在每个节点上至多有 3 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平移。不考虑弯曲或者扭转。扭转弹簧-阻尼器选项意味着单纯的旋转单元，在每个节点上有 3 个自由度：绕节点坐标系 X、Y、Z 轴的旋转。不考虑弯曲或者轴向荷载。弹簧-阻尼器单元没有质量。可利用适当的质量单元来增加质量。也可以不使用本单元的弹簧或阻尼功能。

COMBIN37 是一种具有开关功能的单向单元。本单元每个节点上有 1 个自由度：在节点坐标方向上的平动，绕节点坐标轴的旋转，压力或温度。具有更多功能（6 自由度和大变形）的控制单元是 COMBIN7。本单元有许多应用，例如，用温度函数控制热流的温度调节器；用速度的函数控制阻尼的机械减振器；用压力的函数控制流动阻抗的安全阀；用位移的函数控制摩擦的摩擦离合器等。

COMBIN39 是一种具有非线性功能的单向单元，可对此单元输入广义的力-变形曲线，该单元可以用于任何分析之中。在一维、二维、三维应用中，本单元都有轴向或扭转功能。

轴向选项表示轴向拉压单元，每个节点有 3 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 的平动。不考虑弯曲和扭转。扭转选项表示一个纯粹的旋转单元，每个节点有 3 个自由度：绕节点坐标轴 X、Y、Z 的转动。不考虑弯曲和轴向荷载。对于每个节点有 2 个或 3 个自由度的单元，本单元具有大位移的功能。本单元没有质量和热容量。

COMBIN40 是由弹簧滑块和阻尼器相并联，然后用串联的方式耦合到一个间隙上的组合体。质量可以分配到一个或两个节点上。本单元的每个节点有一个自由度：节点的平动，旋转，压力或温度。质量、弹簧、滑块、阻尼器和间隙可以被移走。本单元可以适用于任何分析。

另一些具有阻尼器、滑块和间隙功能的单元有：COMBIN7，LINK10，CONTAC12，COMBIN14，CONTAC26，MATRIX27，COMBIN37，COMBIN39，CONTAC48，CONTAC49 和 CONTAC52。

（8）质量单元

MASS21 是有多达 6 个自由度的点单元：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕 X、Y、Z 轴的转动。在每个坐标轴方向可以分配不同的质量和转动惯量。

MASS21 单元可以理解为通常意义上的质点，该单元只能使用集中荷载，支持弹性、大变形与单元生死。

（9）接触单元

接触单元是用来模拟两个实体间接触、摩擦行为的专用单元。ANSYS 提供了 3 种接触方式：点对点、点对面和面对面。

如表 3-7 所示，给出了常用的组合与相应的接触功能。

表 3-7　接触单元对

接触方式	点对点	点对面	面对面		线对线	线对面
接触单元	178	175	171，172	173，174	176	177
目标单元	—	169，170	169	170	170	170

这里取比较常用的面对面单元对进行详细介绍。

CONTA171 用于表示二维“目标”面（TARGE169）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有两个自由度：沿节点坐标系 X、Y 方向的平动。本单元位于无中间节点的二维实体、壳或梁单元（PLANE42、PLANE67、PLANE182、HYPER56、VISCO106、SHELL51、BEAM3、BEAM23、PLANE13、PLANE55 或 MATRIX50）表面，并与其依附的实体、壳或梁单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE169）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑摩擦和剪应力摩擦状态。

CONTA172 用于表示二维“目标”面（TARGE169）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有两个自由度：节点坐标系的 X、Y 方向的平动。本单元位于有中间节点的二维实体单元（PLANE2、PLANE183、HYPER74、PLANE82、HYPER84（KEYOPT(1)＝1）、VISCO88、VISCO108、PLANE35、PLANE77 或 MATRIX50）表面，并与其依附的实体单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE169）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑摩擦和剪应力摩擦状态。

CONTA173 用于表示三维“目标”面（TARGE170）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有 3 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。本单

元位于无中间节点的三维实体或壳单元（SOLID5、SOLID45、SOLID46、SOLID64、SOLID65、SOLID69、SOLID70、SOLID185、HYPER58、HYPER86、VISCO107、SHELL28、SHELL41、SHELL43、SHELL57、SHELL63、SHELL143、SHELL157、SHELL181 与 MATRIX50）表面，并与其依附的实体或壳单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE170）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑和剪应力摩擦状态。



CONTA174 用于表示三维“目标”面（TARGE170）和本单元所定义的变形面之间的接触和滑移状态。该单元每个节点有 3 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。

本单元位于有中间节点的三维实体或壳单元（SOLID87、SOLID90、SOLID92、SOLID95、SOLID98、SOLID186、SOLID187、SOLID191、HYPER158、VISCO89、SHELL91、SHELL93、SHELL99 与 MATRIX50）表面，并与其依附的实体或壳单元面有相同的几何特性。当单元表面穿透指定目标表面上的目标单元（TARGE170）时，接触状态开始。本单元允许处理库仑和剪应力摩擦状态。

CONTA178 表示任何两种类型单元的任何两个节点之间的接触与滑移。该单元有两个节点，每个节点有 3 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动。可以通过约束 UZ 自由度来模拟 2-D 和轴对称问题。此单元具有记录接触面间的法向应力和切向摩擦力的功能。可以在接触法向施加预荷载，也可以设置间隙。纵向阻尼也可以加入单元中。

TARGE169 与相关接触单元（CONTA171 和 CONTA172）联用，表示各种二维“目标”表面。接触单元覆盖于变形体边界的实体单元上，并可能与 TARGE169 定义的目标表面接触。该目标表面离散为一系列目标单元（TARGE169），并通过共享实常数号与相关接触表面配对。在目标单元上可以施加任意平动或旋转位移，也可施加力和力矩。对于刚性目标，这些单元可方便地模拟复杂的目标形状；对于柔性目标，这些单元覆盖于变形体边界的实体单元上。

TARGE170 与各种相关接触单元（CONTA173 和 CONTA174）联用，表示三维“目标”表面。接触单元覆盖于变形体边界的实体单元上，并可能与 TARGE170 定义的目标表面接触。目标表面离散为一系列目标单元（TARGE170），并通过共享实常数号与相关接触表面配对。在目标单元上可以施加平动或旋转位移，也可施加力和力矩。对于刚性目标，这些单元可方便地模拟复杂的目标形状；对于柔性目标，这些单元覆盖于变形体边界的实体单元上。

（10）矩阵单元

MATRIX27 代表一种任意的单元，单元的几何特性无定义，但其弹性运动学响应可用刚度、阻尼或质量系数来指定。本矩阵单元连接两个节点，每个节点有 6 个自由度：沿节点坐标系 X、Y、Z 方向的平动和绕节点坐标系 X、Y、Z 轴的转动。

MATRIX50 将一组普通单元装配成一个单元。超单元一旦产生，就包含在 ANSYS 模型中，且可以应用于本单元允许的任何分析类型。超单元大大降低了许多分析的成本。一旦超单元矩阵形成，它们就被存储在一个文件中，而且可以用在其他的分析中，就像其他任何 ANSYS 单元被使用的方式一样。多荷载向量也可以存储于超单元矩阵，因此允许使用多种荷载。

两种矩阵单元的共同特点在于这是一种抽象的分析工具，可以表示任意单元，只表示某一种抽象的特定的物理性质。

（11）表面效应单元

SURF153 单元可用于各种荷载及表面效应之应用，可覆于任何二维结构实体单元（轴

对称谐单元 PLANE25、PLANE83 和 FLUID81 除外）表面。本单元适用于二维结构分析，几何模型如图 3-26 所示。

SURF154 单元可用于各种荷载及表面效应之应用，可覆于任何三维单元表面，几何模型如图 3-27 所示。该单元适用于三维结构分析，并可同时施加各种荷载和表面效应。

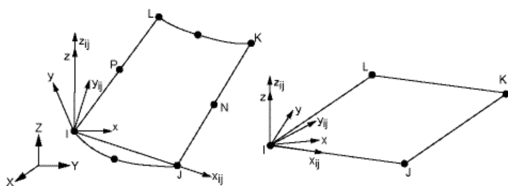


图 3-26　SURF153 单元　　　　图 3-27　SURF154 单元

（12）网格划分单元

MESH200 仅是“网格划分”单元，与求解无关，如图 3-28 所示。它是为了实现多步网格划分的操作而设计的。例如：拉伸需要用低阶的网格划分来创建高阶的网格划分，用来划分二维或三维空间中（包括有或无中节点）的线或三维空间中（包括有或无中节点）的三角形或四边形的面，用来存储物理性质还没指定的单元。

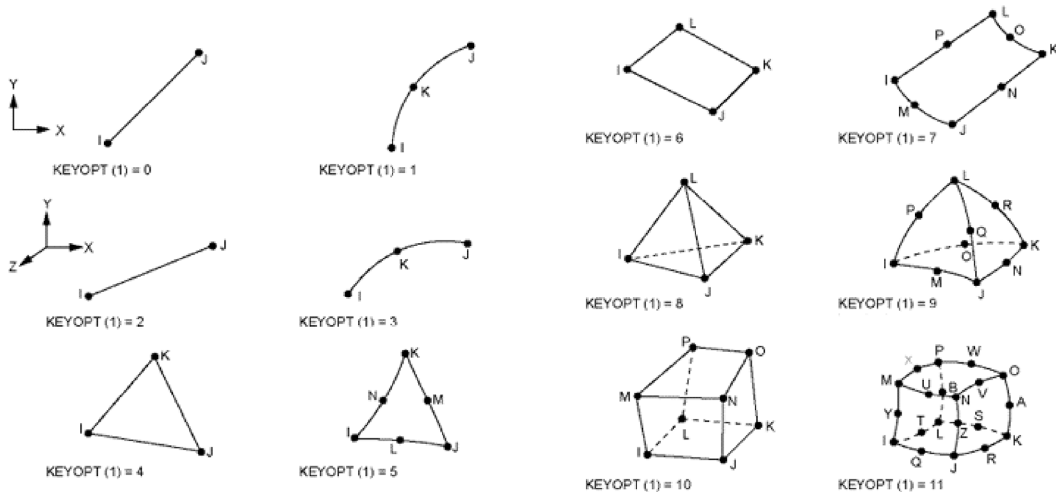


图 3-28　MESH200 单元的不同几何状态

MESH200 可以与任何其他 ANSYS 单元类型结合使用。当不需用它时，它能被删除，也可保留，它的存在并不会影响结果。

3.1.2 热单元

常用的热单元有 LINK33（三维传导杆）、PLANE55（二维热实体）、SHELL57（热壳）、SOLID70（三维热实体）、SHELL131（4 节点热层壳单元）、SHELL132（8 节点热层壳单元）等。

LINK33 是用于节点间热传导的单轴单元，如图 3-29 所示。该单元每个节点只有 1 个温

度自由度。热传导杆单元可用于稳态或瞬态的热分析问题。如果包含热传导杆单元的模型还需要进行结构分析，该杆单元可被一个等效的结构单元所代替。

PLANE55 可作为一个具有二维热传导能力的平面或轴对称环单元使用，如图 3-30 所示。该单元有 4 个节点，每个节点只有一个温度自由度。该单元可用于二维稳态或瞬态热分析问题，并可以补偿由于恒定速度场带来的质量输运热流。如果包含热单元的模型还需要进行结构分析，该单元应当被一个等效的结构单元（如 PLANE42）所代替。

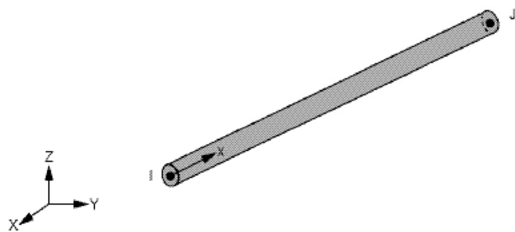


图 3-29　LINK33 单元

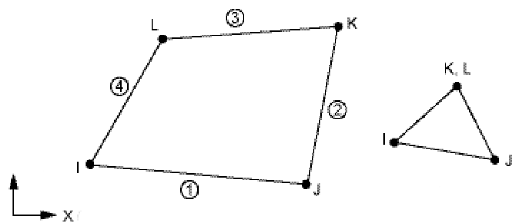


图 3-30　PLANE55 单元

SHELL57 是一个三维的具有面内导热能力的单元，如图 3-31 所示。该单元有 4 个节点，每个节点只有一个温度自由度。该热壳单元可用于三维的稳态或瞬态热分析问题。如果包含热壳单元的模型还需要进行结构分析，该单元可被一个等效的结构单元（如 SHELL63）所代替。如果面内及横向上的导热都需要考虑的话，则需要使用热实体单元（如 SOLID70 或 SOLID90）。

SOLID70 是一个具有导热能力的单元，如图 3-32 所示。该单元有 8 个节点，每个节点只有一个温度自由度。该单元可用于三维的稳态或瞬态热分析问题，并可以补偿由于恒定速度场质量输运带来的热流损失。如果包含导热实体单元的模型还需要进行结构分析，该单元应当被一个等效的结构单元（如 SOLID45）所代替。此单元存在一个选项，可用来模拟通过多孔介质的非线性稳态流动。使用这一选项时，原有的热参数被解释成类似的流体流动参数，例如，温度自由度等效为压力自由度。

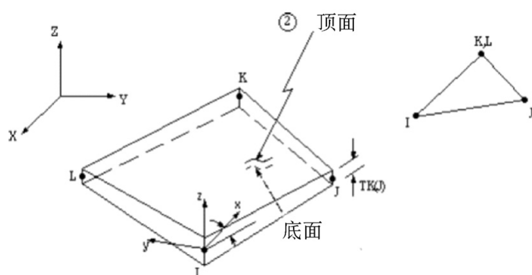


图 3-31　SHELL57 单元

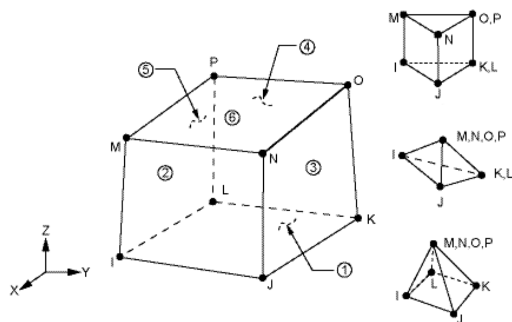


图 3-32　SOLID70 单元

3.1.3 电磁单元

常用的电磁单元有 SOURC36（电流源）、SOLID97（三维磁实体）、SOLID122（三维二

十节点静电实体）、CIRCU124（通用电路）、SOLID123（三维 10 节点四面体静电实体）等。

SOURC36 是一个简单的（包括预先定义好的几何模型）用于给磁场问题提供电流源数据的单元，如图 3-33 所示。单元描述了模型内电流的分配，该模型使用一个标量势方程（自由度 MAG）。电流用于计算源磁场强度（Hs），使用数字积分技术包括 Biot-Savart 法则。方程中使用 Hs 作为模型上的磁荷载。

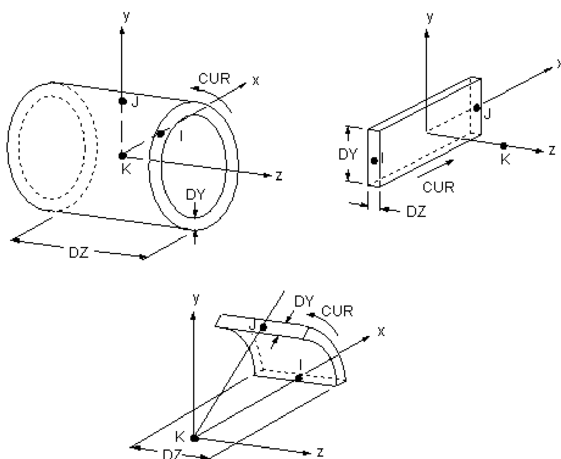


图 3-33　SOURC36 单元

SOLID97 用于模拟三维磁场，如图 3-34 所示。单元由 8 个节点定义，在已定义的 6 个自由度之外尚有 5 个自由度，它们是磁向量势能（AX、AY、AZ）、电标量势能（VOLT）、电流（CURR）和电动势（EMF）。SOLID97 基于以库伦为度量的磁向量势能方程，可用于下列低频磁场分析：静磁、涡流（AC 时间谐波和瞬态分析），电动势磁场（静态、AC 时间谐波和瞬态分析）和电磁环路耦合场（静态、AC 时间谐波和瞬态分析）。对模拟 B-H 曲线或永久消磁曲线，单元有进行非线性磁场分析的功能。

SOLID122 是一个三维 20 节点实体单元，如图 3-35 所示。在每个节点上单元有一个电势自由度。它可以容忍不规则的形状而没有太大的精度损失。SOLID122 单元有协调的电势形状并能很好地模拟弯曲的边界。20 节点静电单元可用于三维静电场分析。

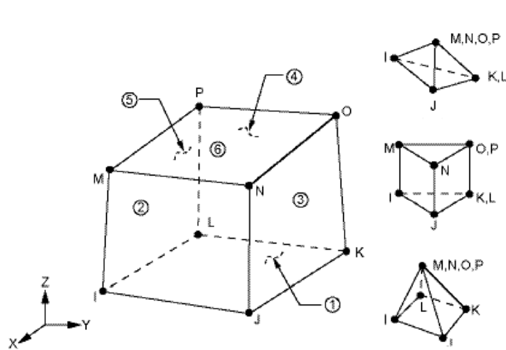


图 3-34　SOLID97 单元

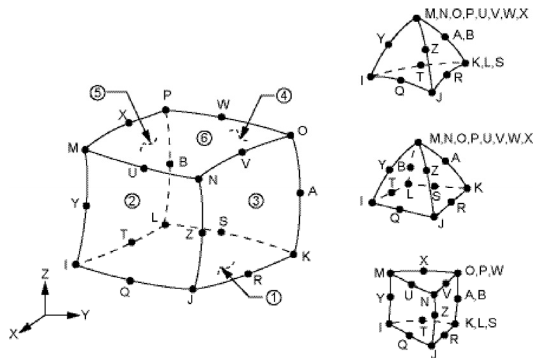


图 3-35　SOLID122 单元

CIRCU124 单元是一个通用的电路单元用于模拟电路，如图 3-36 所示。此单元可以与

电磁有限元相结合来模拟耦合电磁环路场的相互作用。单元有 6 个节点来定义环路组元，每个节点有 3 个自由度来模拟环路响应。对电磁环路场耦合，单元可以与二维和三维电磁场单元 PLANE53 和 SOLID97 相连接。IRCU124 单元可用于静态、谐波和瞬态分析。

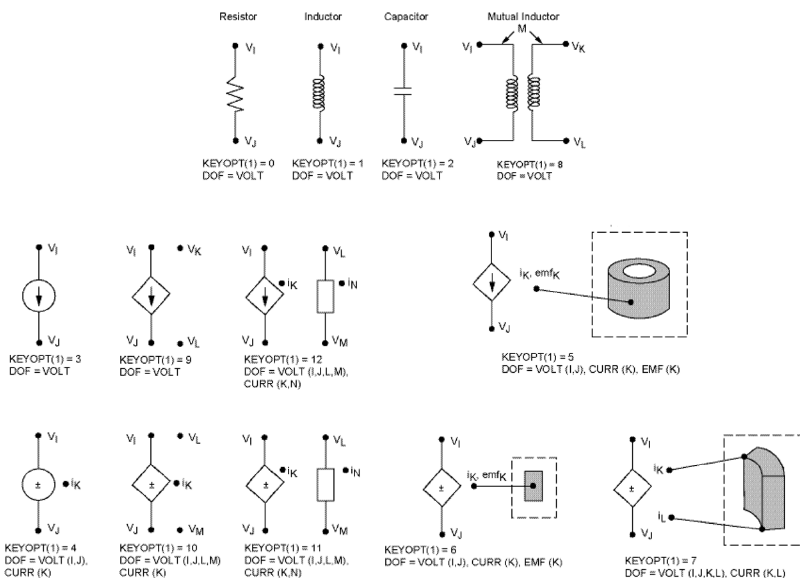


图 3-36　CIRCU124 单元

TRANS126 代表将能量从静电场转换到结构场的转换单元，同时也允许能量储存，如图 3-37 所示。在结构有限元分析及机电环路模拟中，此单元完全耦合机电场并描述一个匹配的降阶模型。在每个节点上单元有两个自由度：在节点 X、Y 或 Z 方向上的平移和电势（VOLT）。单元用于模拟微机电设备（MEMS）的机电响应，如静电蜂巢驱动器，电容传感器和 RF 开关。单元的特征可从应用静电单元 PLANE121、SOLID122、SOLID123、SOLID127、SOLID128 及 CMATRIX 宏的机电设备的静电场模拟中导出。TRANS126 单元描述设备在一个方向上运动的电容响应。运行一系列静电模拟并导出电容（CMATRIX 命令）作为冲程（或挠度）的函数可以给这个单元提供必要的输入。电容与冲程的关系可描述在这个传感器单元中用于模拟的设备的“降阶”的特性。从一系列静电模拟中可得出 3 个方向的（X、Y 或 Z）特性，创建 3 个独立的传感器单元可反映设备的整体平动响应。

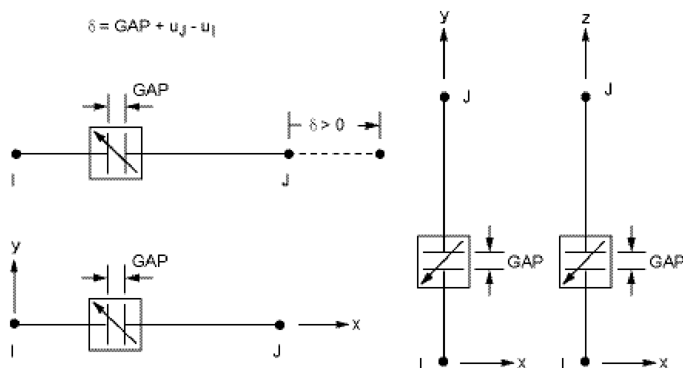


图 3-37　TRANS126 单元

TRAN126 单元的变形-电容关系如图 3-38 所示，变形-力关系如图 3-39 所示。

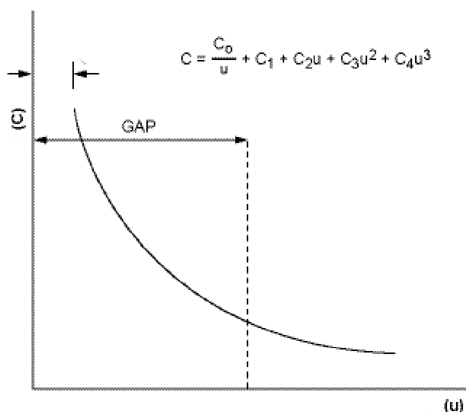


图 3-38 TRANS126 单元变形-电容曲线

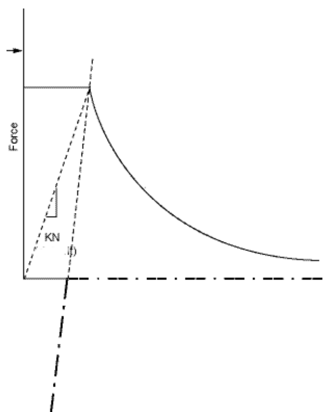


图 3-39 TRANS126 单元变形-力曲线

3.1.4 耦合场单元

SOLID226（三维耦合场实体）、PLANE223（二维耦合场实体）、SOLID62（三维磁-结构实体）、PLANE67（二维热-电实体）、LINK68（热-电线单元）、SOLID98（四面体耦合场实体）、TRANS126（机-电传感器单元）、SHELL157（耦合热-电壳）等。

LINK68（见图 3-40）是一个三维空间中的单轴单元，能够在节点间传导热和电流。由电流流动生成的焦耳热也包括在热平衡中。在每个节点上单元有两个自由度，温度和电压。尽管单元中不包括瞬态电容或电感系数，热-电线单元可被用于稳态和瞬态热分析。单元是线性的，但在热求解中需要迭代解法来包括焦耳热效应。如果没有电效应，可用传导杆单元（LINK33）。如果包括热电单元的模型也被用于结构分析，应用等效结构单元代替。

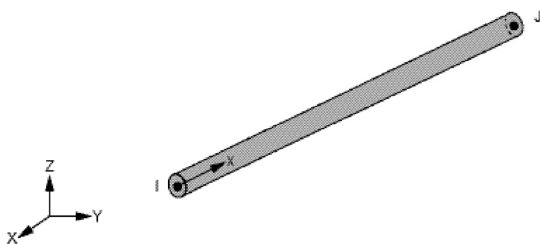


图 3-40 LINK68 单元

SHELL157（见图 3-41）是三维有面内热和电传导能力的单元。该单元有四个节点，每个节点有两个自由度：温度和电压。尽管没有包括瞬态电容或自感应效应，该单元可用于三维稳态或瞬态热分析。该单元需要进行迭代求解以便在热分析中包括焦耳热效应。如果没有电效应，可用二维热实体（SHELL57）单元。如果包含热-电单元的模型需要进行结构分析，将该单元用相应的结构单元来代替（如 SHELL63）。如果面内和横向热-电传导都需要，使用热-电实体单元（SOLID69）。

SOLID98（见图 3-42）是一种 10 节点的四面体单元，它是 8 节点 SOLID5 的高阶单元。本单元存在二次位移形函数，适合建立不规则的网格模型（如由各种 CAD/CAM 系统生

成的网格模型）。本单元由 10 个节点定义，每个节点有 6 个自由度。单元的详细特性请参考单元理论手册。

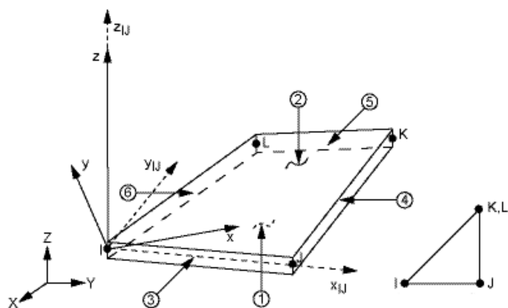


图 3-41　SHELL157 单元

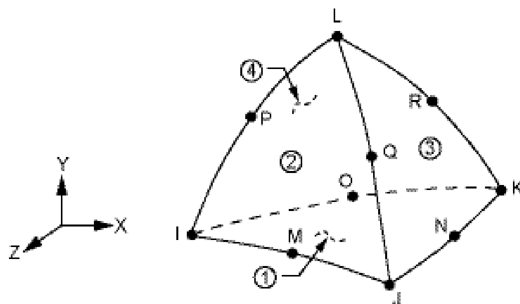


图 3-42　SOLID98 单元

3.1.5 流体单元

常用的流体单元有 FLUID29（二维声学流体）、FLUID30（三维声学流体）、FLUID116（热-流管单元）、FLUID129（二维无限声学单元）、FLUID130（三维无限声学单元）、FLUID141（二维流体-热）、FLUID142（三维流体-热）等。

FLUID30 用于模拟流体介质及流体/结构相互作用的界面，如图 3-43 所示。典型的应用包括声波的传播和水下结构动力学。声学的控制方程，又称为三维波动方程，被离散用以考虑声压和结构运动在界面上的耦合。该单元有八个节点，每个节点有 4 个自由度：X、Y、Z 方向的平动和压力。但只有在界面上节点的平动才有效。单元可包括界面上吸收材料的声波衰减。该单元可与其他三维结构单元一起使用，完成非对称或阻尼模态的全谐波响应和全瞬态法分析。当没有结构移动时，单元也可用于静态的、模态和衰减谐波响应分析。

FLUID130 是作为 FLUID30 单元的配套单元开发的，如图 3-44 所示。在用 FLUID30 单元建立模型后，可用该单元作为封套。它模拟了流体域扩展到 FLUID30 有限元域的边界外的无限流体域的吸收效果。FLUID130 单元作为二阶的吸收边界条件，传出的压力波到达模型边界时将被“吸收”，只有微量反射回流体域。该单元可被用作三维流体域的边界。它是一个平面表面单元，有 4 个节点，每个节点只有一个压力自由度。FLUID130 可用于瞬态、谐波及模态分析。典型应用包括结构声学、噪声控制、水下声学等。

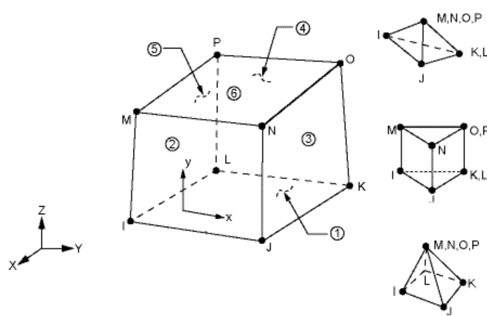


图 3-43　FLUID30 单元

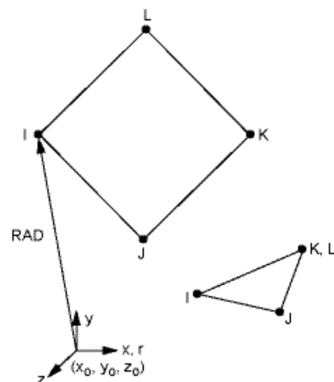


图 3-44　FLUID130 单元

3.2 单元属性的设置

每个单元有以下与之相关的属性：

- 单元类型（TYPE）。
- 实常数（REAL）。
- 材料特性（MAT）。

只要模型中有多种单元类型（TYPEs），实常数（REALs）和材料（MATs），就必须确保给每一种单元指定了合适的属性。有以下 3 种途径。

- 在网格划分前为实体模型指定属性。
- 在网格划分前对 MAT，TYPE，和 REAL 进行“总体的”设置。
- 在网格划分后修改单元属性。

3.2.1 单元类型（TYPE）

在 GUI 界面中，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，打开 Element Types 对话框，如图 3-45 所示。

对话框下共有 3 个选项：Add、Options 和 Delete，分别对应添加单元、设定单元特性以及删除单元操作。通常只用添加所需单元，单击 Add 按钮，进入对话框，如图 3-46 所示。

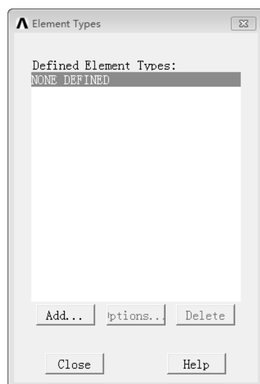


图 3-45 Element Types 对话框

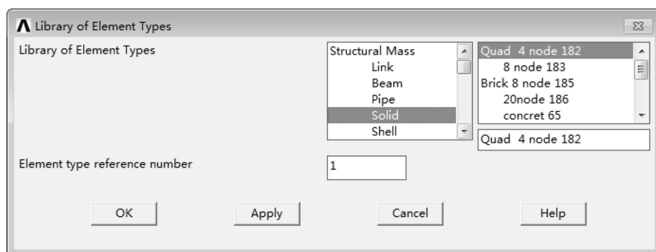


图 3-46 添加单元

以 PLANE182 单元为例，选择 Solid>Quad 4 node 182 单元，单击 OK 按钮完成添加。此单元有多项功能，假设现在需要进行一个平面应变问题的分析，则可以为其设置单元特性，回到图 3-45 所示的对话框，选择 PLANE182，单击 Options 按钮，进入 PLANE182 element type options 对话框，如图 3-47 所示。将 K3 选择为 Plane strain，单击 OK 按钮完成。

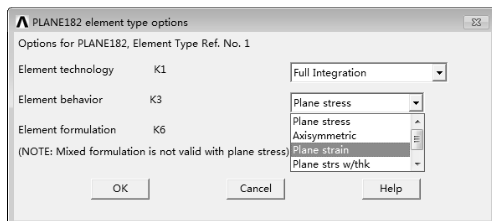


图 3-47 设定单元特性

提示：通常一个分析模型需要多种单元类型，均按此种方法添加。

3.2.2 实常数（REAL）

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete，进行实常数的添加、编辑及删除。以 LINK180 单元为例，添加 LINK180 单元，然后进入实常数设置对话框，单击 Add 按钮，在弹出的对话框中选中 LINK180，单击 OK 按钮，得到对话框如图 3-48 所示。在这里可以看到具体的各项实常数代表的意义。第一个输入框是实常数的编号，第二个则是单元的截面积。

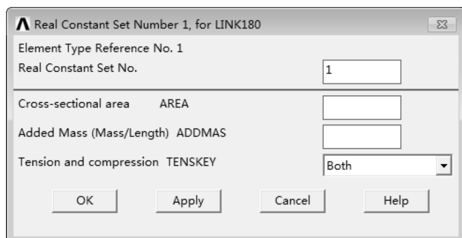


图 3-48 设定实常数

对于不同类型的单元，实常数的各项值代表意义不同，如 LINK 单元的实常数通常为杆件的截面积、线密度等，SHELL 单元可通过实常数设定板壳厚度。对于弹簧单元，则可设置弹簧刚度。

3.2.3 材料特性（MAT）

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，打开定义材料模型对话框，如图 3-49 所示。对话框左栏是当前已定义的材料信息。右栏则为设定各种材料的材料库。

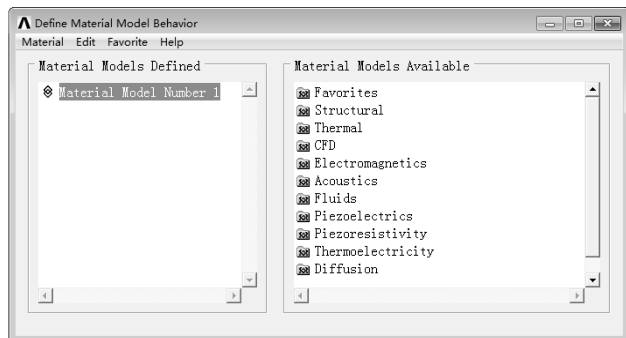


图 3-49 定义材料模型

设定分析中所需的各种材料属性及参数，ANSYS 材料库很丰富，此处列举一些结构力学分析中常用的材料属性。

在右栏选择 structural>Linear>Elastic>Isotropic，双击打开线弹性参数设定，这里可设定弹性模量 EX，泊松比 PRXY。同样选择 Material Models Available> Structural>Density，双击可以添加材料的密度。

3.2.4 截面特性设置（SECTION）

以 BEAM 单元为例，生成一空心圆截面梁。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections 打开 Beam Tool 对

话框，如图 3-50 所示。单元 ID 设为 1，截面选择空心圆管，Ri=350，Ro=450，单击 OK 按钮完成设置。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS，定义 N1=0，0，0；N2=5000，0，0；生成 5m 长梁的两端节点。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes，生成梁。

此时的梁模型只是一条直线。再通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape，打开单元尺寸显示，得到梁单元模型如图 3-51 所示。

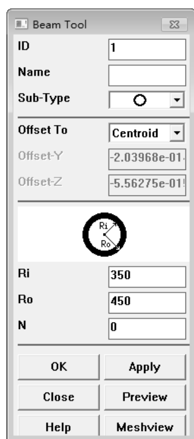


图 3-50　Beam Tool 对话框

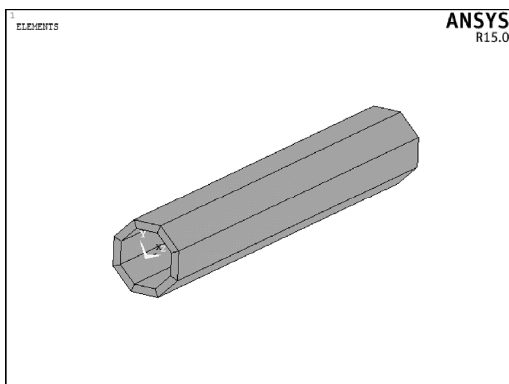


图 3-51　梁模型

3.3　本章小结

本章系统讲解了 ANSYS 的单元体系，理解单元类型与不同单元的特性是进行计算前最为重要的准备工作之一。

单元类型的确定影响整个计算的正确性。在有限元数值求解中，单元的等效节点力、刚度矩阵、质量矩阵等均用数值积分生成，连续体单元以及壳、板、梁单元的面内均采用高斯（Gauss）积分，而壳、板、梁单元的厚度方向采用辛普生（Simpson）积分。辛普生积分点的间隔是一定的，沿厚度分成奇数积分点。由于不同单元的刚度矩阵不同，采用数值积分的求解方式不同，因此实际应用中，一定要采用合理的单元来模拟求解。

第4章 网 格 划 分



在上一章中为读者讲解了 ANSYS 的单元系统及如何对单元的属性进行控制，在本章中，将为读者讲解如何进行网格的划分，也即将上一章所讲述的各单元类型的属性（包括模拟的物理特性以及在计算中的数学特性）赋予几何模型，以控制模型的属性，使模型表现出尽可能接近实际工况的特征。

本章学习目标

- 理解网格控制与单元属性的关系。
- 掌握各种划分网格的方法。
- 掌握编辑网格的方法。

4.1 网格的控制

一般来讲，网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模也会增加。

网格数量的多少将影响计算结果的精度和计算规模的大小。所以在确定网格数量时应权衡两个因数综合考虑。

4.1.1 智能网格划分

对初学用户而言，ANSYS 提供的网格自动划分工具是一种快捷的网格划分方式。

在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Mesh Tool 命令，弹出如图 4-1 所示的 Mesh Tool 对话框。

勾选 Smart Size 选项，即可通过拖动滑块调整网格的尺寸级别，范围从 1（精细）～10（粗糙），默认级别为 6。

在尺寸控制项目中，可选择上述操作是针对全局（Global）的，或是针对面、线等几何元素设置。

高级的智能网格控制，如网格扩张和过渡系数的设置，在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>Smart Size>Adv Opts 命令弹出如图 4-2 所示的 Advanced SmartSize Settings 对话框。

不同的网格划分尺寸级别如图 4-3 所示。

4.1.2 全局单元尺寸控制

全局单元尺寸控制能为整个模型指定最大的单元边长，或指定每条线被分成的份数。

在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Size Controls-Global>Set 命令，也即在图 4-1 中的 Size Controls 选择 Global>Set，弹出如图 4-4 所示的 Global Element Sizes 对话框。

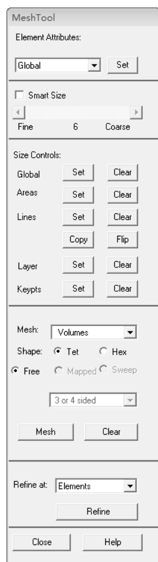


图 4-1　MeshTool 对话框

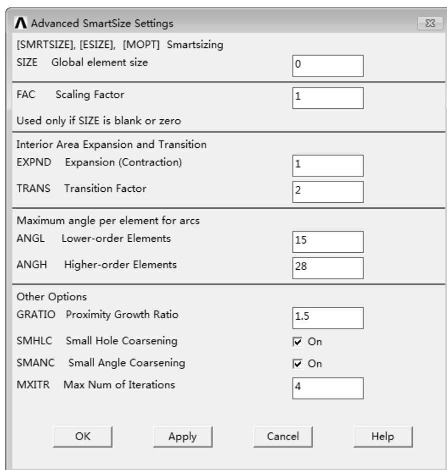


图 4-2　Advanced SmartSize Settings 对话框

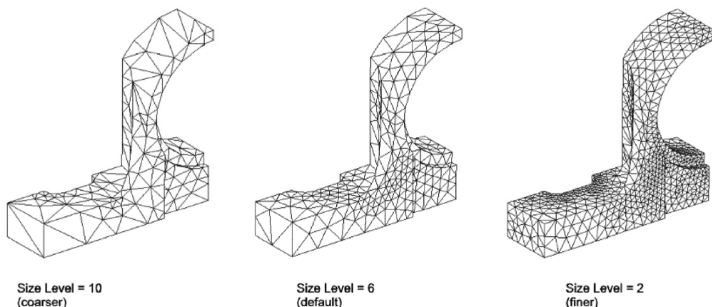


图 4-3　不同的网格划分尺寸级别

在该对话框中，SIZE 为最大的单元边长，NDIV 为每条线被分成的份数，两者只需要指定其一即可。

在主菜单中的 Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>Manual Size>Global>Size 命令也可弹出图 4-4 所示的对话框。

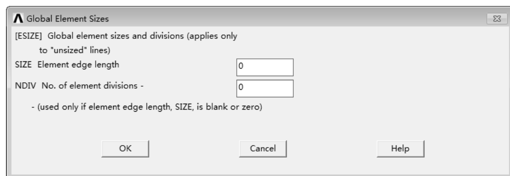


图 4-4　Global Element Sizes 对话框

提示：以上操作也可由 ESIZE 或 SIZE 命令来完成，单独使用 ESIZE 命令时（关闭智能划分网格功能），将采用相同的单元尺寸对体或面划分网格，若与智能划分功能一同使用时，ESIZE 起引导作用，但为了适应线的曲率或几何近似指定的尺寸可能无效。

4.1.3 默认单元尺寸控制

如用户不进行任何的指定，ANSYS 将采用默认的单元尺寸，它将根据单元阶次指定线

的最小与最大份数及表面高宽比等。

一般情况下默认单元尺寸应用于映射网格划分，但智能网格划分关闭时，自由网格划分也可以使用。

在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>Manual Size>Global>Other 命令，弹出如图 4-5 所示的 Other Global Sizing Options 对话框，即可进行默认状态下的单元尺寸控制，方法同 4.1.2 节，此处不再赘述。

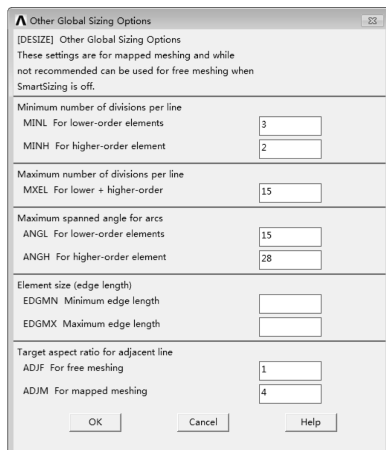


图 4-5　Other Global Sizing Options 对话框

4.1.4 关键点尺寸控制

关键点尺寸是指通过关键点控制单元尺寸。

在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Size Controls-Keypts>Set 命令，弹出 Elem Size at Picked Keypoints 对话框。

在工作区中拾取要控制的关键点，单击 OK 按钮，弹出如图 4-6 所示的 Element Size at Picked Keypoints 对话框。

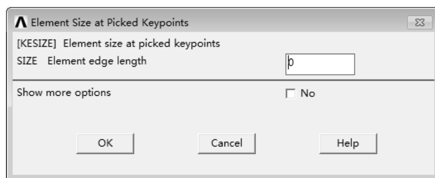


图 4-6　Element Size at Picked Keypoints 对话框

提示：不同的关键点可以设置不同的关键点尺寸，为用户在网格控制上提供更多控制，特别是在结构的应力集中区应用方便。当智能网格打开时，为了适应线的曲率或几何近似指定的尺寸可能无效。

4.1.5 线尺寸控制

线尺寸是指通过控制线控制单元尺寸。在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Mesh

Tool>Size Controls-Lines>Set 命令，弹出如图 4-7 所示的 Elem Size on Picked Line 对话框。

在工作区中拾取要控制的线，单击 OK 按钮，弹出如图 4-8 所示的 Element Size on Picked Lines 对话框。

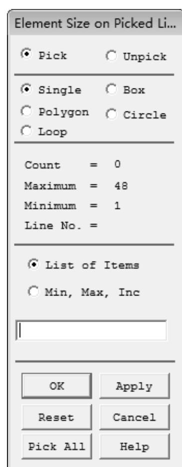


图 4-7　Elem Size on Picked Lines 对话框 1

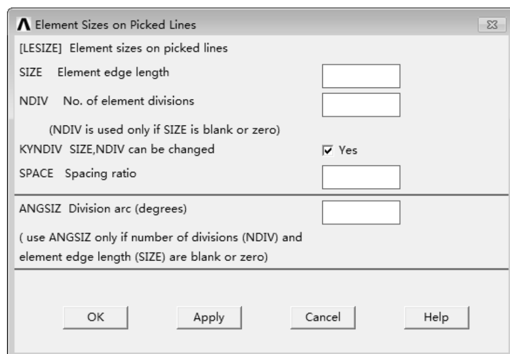


图 4-8　Element Size on Picked Lines 对话框 2

提示：用户可以为不同的线指定不同的单元尺寸，指定的尺寸可以是强的或弱的，区别在于，强的尺寸可以智能网格划分打开时使用户指定的尺寸优先，弱的尺寸在智能网格划分打开时可能无效，以智能网格划分程序优先。

现以一地基刚性基础为例说明借助于线的网格尺寸控制，如图 4-9 所示。

在如图 4-1 所示的网格划分工具中最上方单元属性定义列表框中选择 Lines，单击列表框右侧的 Set 按钮，弹出 Line Attributes 对话框，拾取模型中控制直线，选中的阶梯部分直线控制尺寸后如图 4-10 所示的虚线部分，弹出如图 4-11 所示的 Line Attributes 对话框。如图 4-12 所示为最终划分效果。

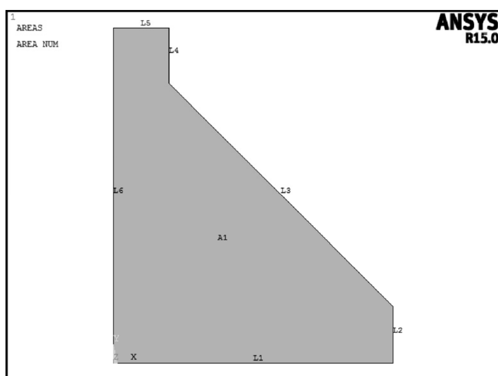


图 4-9　几何模型

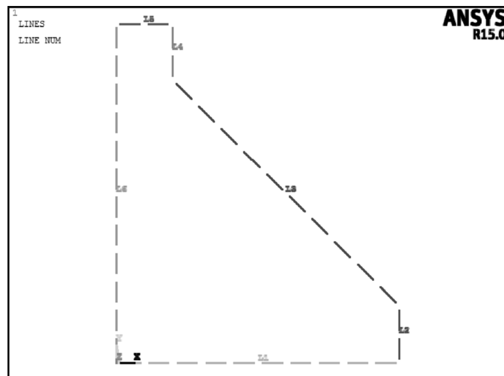


图 4-10　直线控制尺寸

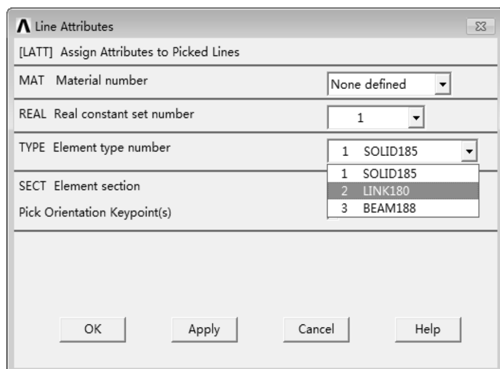


图 4-11 Line Attributes 对话框

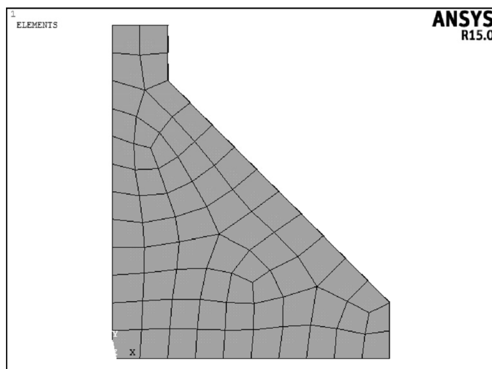


图 4-12 划分网格后

在 Line Attributes 对话框中的 TYPE Element type number 列表框中选择 1 SOLID185，单击 OK 按钮，完成单元类型设置。

通过 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free 完成面的划分。

完成划分操作后，在通用菜单元中选择 Plot>Elements 命令，划分线的结果应如图 4-12 所示。

4.1.6 面尺寸控制

关键点尺寸是指通过关键点控制单元尺寸。

在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Size Controls-Areas>Set 命令，也即在图 4-1 中的 Size Controls 中选择 Areas>Set，弹出 Elem Size at Picked Areas 对话框。

在工作区中拾取要控制的面，单击 OK 按钮，弹出如图 4-13 所示的 Element Size at Picked Areas 对话框。

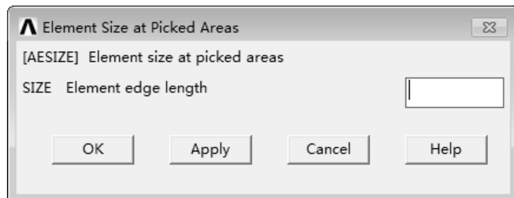


图 4-13 Elem Size at Picked Areas 对话框

提示：用户可以为不同的面定义不同的单元尺寸，面与面的交线仅在未指定线尺寸与关键点尺寸且邻近无尺寸更小的面时使用指定的尺寸，当智能网格划分打开时为了适应线的曲率或几何近似指定的尺寸可能无效。

4.2 简单网格划分实例

本节以第 2 章中 2.2 节建立的带孔矩形板模型为例，说明网格划分的具体操作步骤。

模型基本参数：板厚度为 25mm，长为 200mm，宽为 150mm，圆孔半径 10mm；弹性模量 E = 20GPa，泊松比μ=0.3。

4.2.1 几何模型的导入

几何模型直接通过 Utilty Menu>File>Resume from 命令，导入第 2 章 2.3 节中完成的建模结果，采用前视图，操作路径如图 4-14 所示，导入模型如图 4-15 所示。

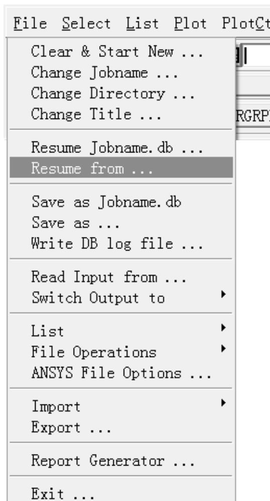


图 4-14 导入模型路径

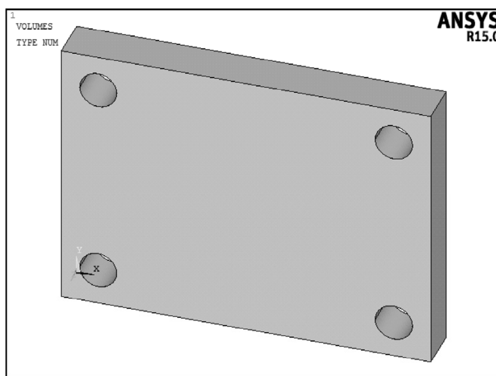


图 4-15 导入的模型

4.2.2 定义单元属性

在主菜单中依次展开选项 Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，单击 Add 按钮，选择 SOLID185 单元。在主菜单中依次选择 Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，进行材料模型设置。

选取各向同性的线弹性模型（Structural>Linear>Elastic>Isotropic），设置弹性模量 EX=20e9，泊松比 PRXY=0.3。

提示：本例中模型是单一材料。若为多种不同材料，则在此步中设置不同材料及模型属性即可，在稍后的步骤中将其赋予对应的部分即可。

4.2.3 网格的控制

在划分网格前，要对网格的控制参数进行设置。

（1）进行 Smart size

通常可以导出 MeshTool 进行操作，路径为 Preprocessor>Meshing>MeshTool，如图 4-16 所示。

单击 Element Attibute 的下拉菜单，选择 Globe，单击其右侧的 set 按钮，进行单元类型选择。在 Size Control 中选择 Global> set，进行网格尺寸设置，如图 4-17 所示。

设置完成后可以在 MeshTool 对话框中直接单击 Mesh 按钮，弹出拾取对话框后单击拾取模型，单击 OK 按钮完成网格的划分。

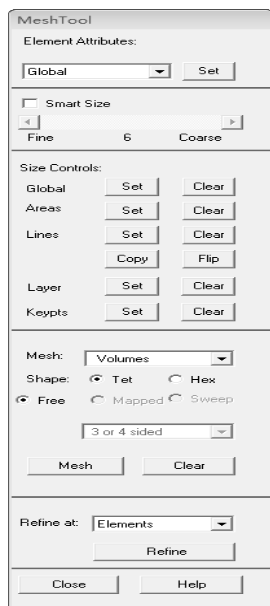


图 4-16　Mesh Tool 对话框

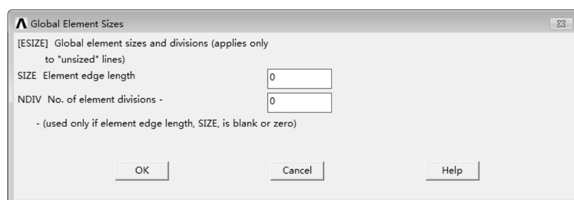


图 4-17　Global Element Sizes

不同的网格尺寸，对应不同网格密度，网格越密后期分析越精确，但相应耗费也越大。对比效果如图 4-18 和图 4-19 所示。

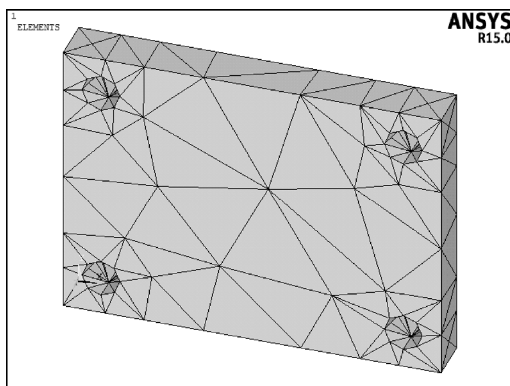


图 4-18　模型网格 element edge size=10

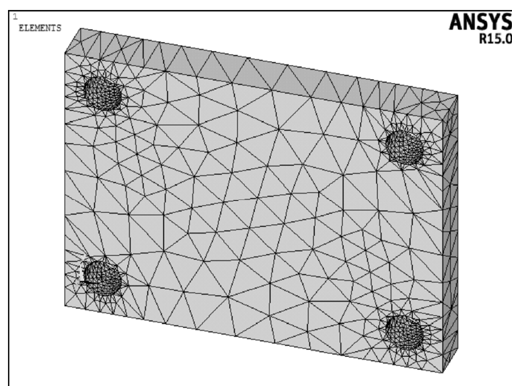


图 4-19　模型网格 element edge size=3

此外，也可以在 Preprocessor>Meshing>Sizecontrol>Manualsize 中进行网格尺寸设置，然后在 Preprocessor> Meshing> Mesh 中进行网格划分的执行。

（2）进行单元尺寸设置

在图 4-16 中，若勾选 Smart mesh，或在 Preprocessor>Meshing>Sizecontrol>Smartsize 中进行网格的自动划分设置，则系统将根据所选的精度等级进行自动划分。

Smart sizeg 为 1（Fine）～10（Coarse）共 10 级，表示由精到粗的 10 个不同等级。默认时默认为 6。

此时，设置的 Element Edge Size 设置的值起指导作用，而精度等级的差异也很明显。

如图 4-20 和图 4-21 所示，二者精度相差很明显。

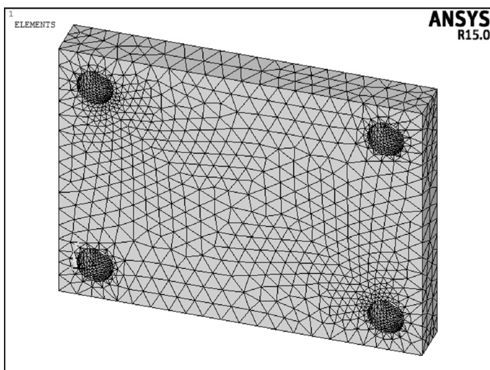


图 4-20　Size 10 精度 3

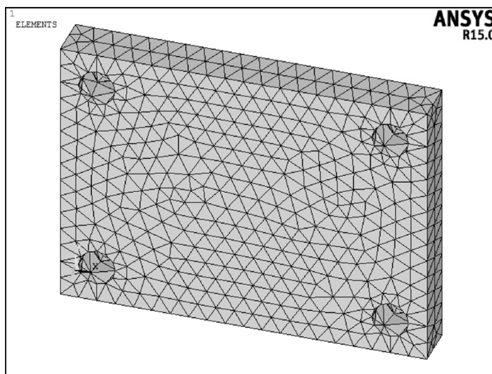


图 4-21　Size 10 精度 8

而如图 4-22 和图 4-23 所示的情况，由于本身尺寸就很精确，因此板体精度差异不十分明显，但是在孔洞处可以明显看出精度差异。

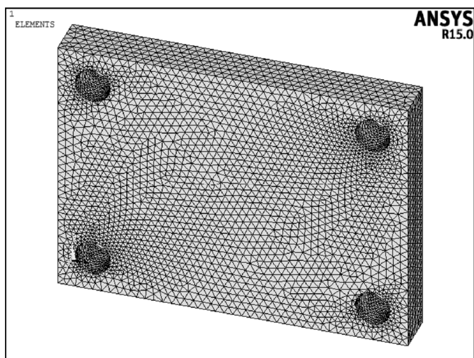


图 4-22　Size 5 精度 3

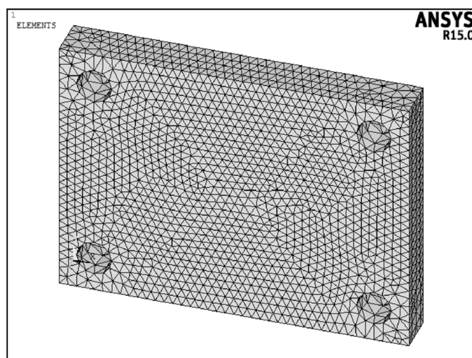


图 4-23　Size 5 精度 8

可见，精度等级较高时，系统自动在形状改变时作出更精确的划分，而精度较低时，圆孔沿周长划分的网格长度与矩形边沿周长划分的网格边沿长度一致，这显然是不够准确的。

4.2.4 网格的清除

若对划分的网格不满意，想重新划分，则可使用 Clear 功能来进行网格清除。以本例来说，选择 Preprocessor> Meshing>Clear>Volumes，即可清除体上的网格，如图 4-24 所示。也可以在 Mesh Tool 中直接单击 Clear 按钮进行清除操作。

此时，清除的对象将根据之前 Mesh 的对象而不同。若之前 Mesh 的对象是 Volume，则弹出的对话框为 Clear Volumes，如图 4-25 所示。

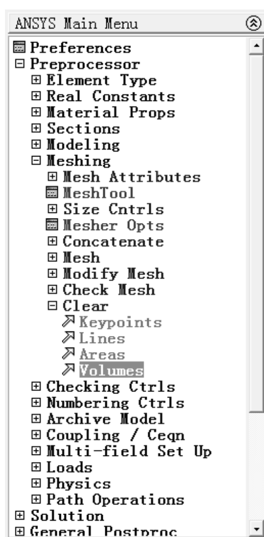


图 4-24　主菜单中网格清除命令

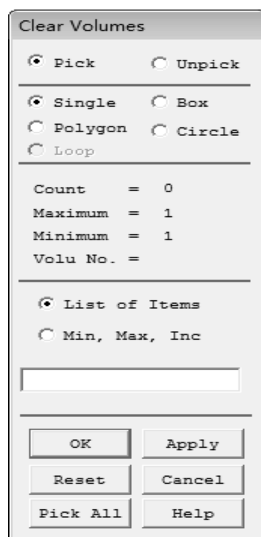


图 4-25　Clear Volumes 对话框

同理，若是面或线，则弹出相应的对话框，然后进行拾取即可。

4.2.5 局部网格

在某些需要局部细化的网格划分中，可以使用 Preprocessor> Meshing>Modify Mesh>Refine At 进行加细操作。

如图 4-26 所示为基于上边线尺寸为 5，下边线设为 10 时的划分效果。图中可以看出由下边缘出发的网格明显尺寸比较大，Size=10，慢慢过渡到接近上边线的网格，直到 Size=5。

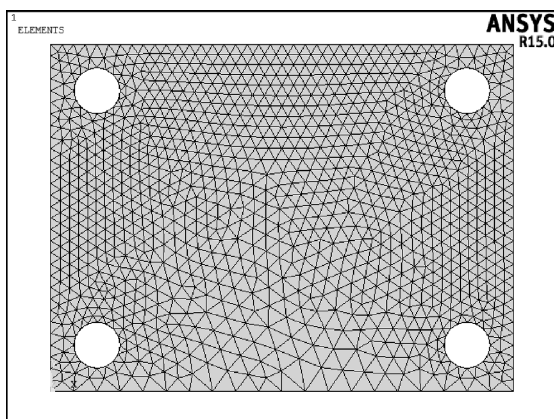


图 4-26　沿线细分网格

提示：如基于某条直线进行细化，则可选择 Preprocessor> Meshing>Modify Mesh>Refine At>Lines，单击拾取直线，进行划分等级设置，1（min）～5（max）级，等级越高划分越细。

4.3　通过拉伸生成网格

前面第 2 章 2.2 节中的自底向上建模中，曾经学习了将几何面拉伸成几何体的操作。同样，在对一个几何面进行划分网格后，也可以将生成的有限元面拉伸成体，这样与面平行方向的网格都同源面上的网格划分一致，而拉伸方向的网格数可以由用户指定。

拉伸生成网格首先要定义两种单元——面单元与体单元。

面单元可选用 MESH200，这是一种仅用于划分网格而不参与求解的单元，也可以选择 PLANE 单元。体单元应与面单元相匹配，如果面单元有中间节点，体单元也应具有中间节点。

下面以一个实例说明如何进行单元拉伸操作，模型基本参数：b×h=200×100，r=50。

建立如图 4-27 所示面的操作步骤如下。

1）进入前处理器，设置单元类型为 MESH200，设置 keyopt（1）为 QUAD 8-NODE。在主菜单中选择 Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 命令，弹出的对话框中单击 Add…按钮，选择 Not Solved、Mesh Facet 200，单击 OK 按钮。

2）单击 Option 按钮，在弹出的对话框中设置 K1 为 QUAD 8-NODE，单击 OK 按钮并关闭对话框。打开 Mesh Tool 对话框进行网格划分，设置单元尺寸 5。完成划分的面单元如图 4-28 所示。

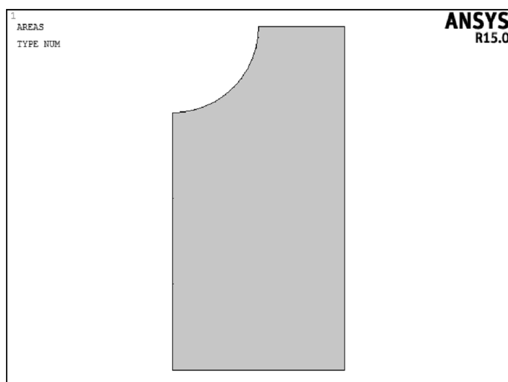


图 4-27　待拉伸平面几何模型

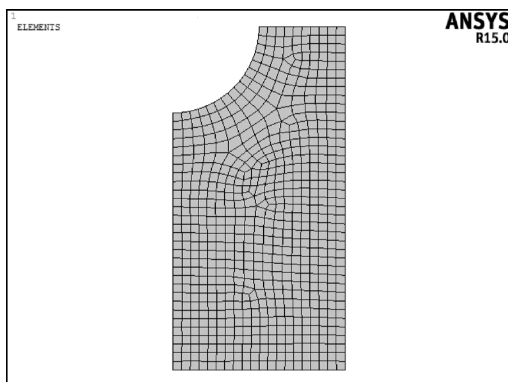


图 4-28　划分网格后的面

3）下一步添加体单元。在 GUI 界面中添加单元 SOLID186。在主菜单中选择 Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Elem Ext Opts 命令，弹出图 4-29 所示的 Element Extrude Options 对话框。选择 TYPE 为 2 SOLID186，VAL1=10，单击 OK 按钮完成。

4）在主菜单中选择 Preprocessor> Modeling> Operate> Extrude> Areas>Along Normal 命令，弹出 Extrude Area Along Normal 对话框。设置 DIST=50，单击 OK 按钮完成。效果如图 4-30 所示。

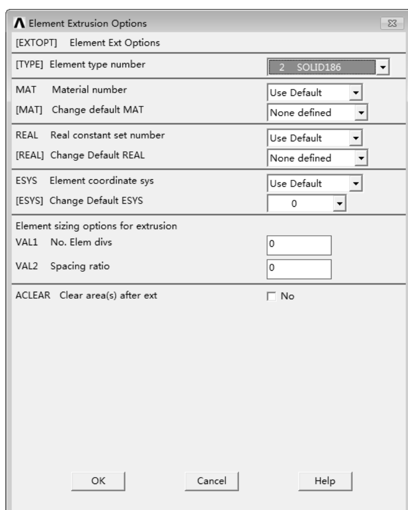


图 4-29 Element Extrude Options

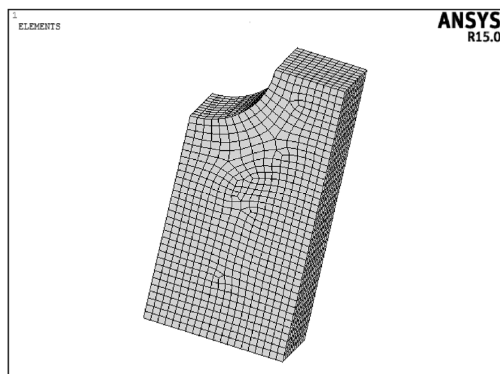


图 4-30 拉伸成体

4.4 映射网格划分 Mapped

映射网格划分 Mapped 只能对于“规则”的体和面，不适合复杂几何体。

映射网格的基本应用条件如下。

- 面有 3 条或 4 条边；体有 4、5、6 个面时可以应用。
- 面是奇数条边，每边上分割成偶数；体为 4 面时，三角形面上单元数必须为偶数。
- 面和体对边上必须划分相同的单元数。
- 面多于 4 条边，体多于 6 个面需要连接、合并、分割。

4.4.1 多边形面的映射网格划分

面映射网格划分的条件，除满足上述要求外，还应注意：

- 必须设置映射网格划分（MSHKEY，1）。根据 MSHAPE 的设置，划分结果全是四边形或全是三角形单元的映射网格。
- 如果生成三角形映射网格，还可用 MSHPATTERN 命令设置三角形网格的模式。
- 如果一个面多于 4 条边，则不能使用映射网格划分。但可合并线和连接线使总线数减少到 4 条，从而实现映射网格划分。该方法多数情况下不如将复杂的面切分（ASBW 等命令）为边数不大于 4 条的多个面，因为这种方法更加方便和快捷。
- 使用连接线的替代方法是用 AMAP 命令，该命令直接拾取 3 个或 4 个角点进行面的映射网格划分，其实质是内部连接两关键点间的所有线。

这里以 2.2 节中用到的八边形为例，说明 Mapped 的方法。

如图 4-31 所示，此面有 8 条边，直接进行 Mapped 则会出现错误提示，如图 4-32 所示。

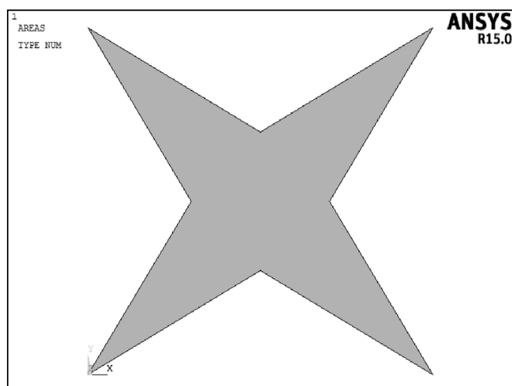


图 4-31　1/4 带孔面板

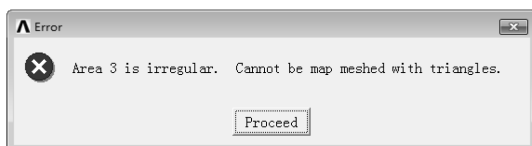


图 4-32　错误提示

这时，需要将其中某些边连成一条，即减少边的数量来满足 Mapped 的条件。如图 4-33 所示的编号可见，源图中有 8 条直线。

在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Concatenate>Lines 命令，弹出 Concatenate Lines 对话框。选择相邻两条直线进行合并，如图 4-34 所示。本例中每两条直线生成一条新的直线，生成的直线编号如图 4-35 中各角点处所示。此时，原本的 8 段直线未变，只是相当于多了 4 条辅助直线，用于划分网格。

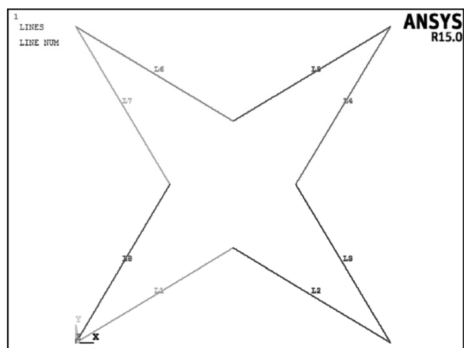


图 4-33　有 8 条线的平面

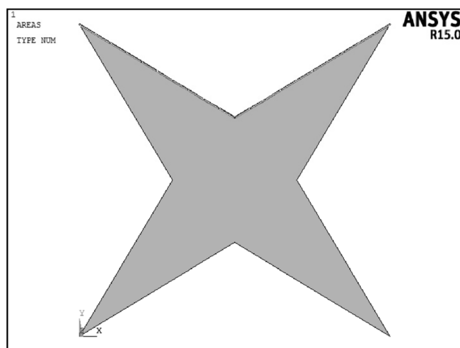


图 4-34　通过直线合成生成 4 条新的线

此时再进行 Mapped 即可，效果如图 4-36 所示。

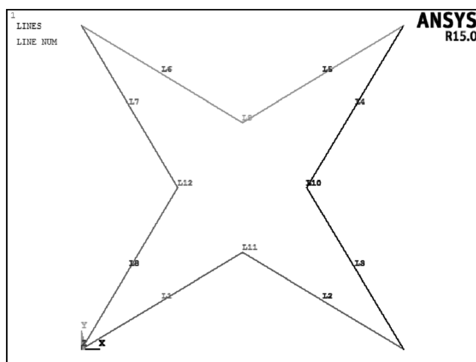


图 4-35　合并右和上两条直线

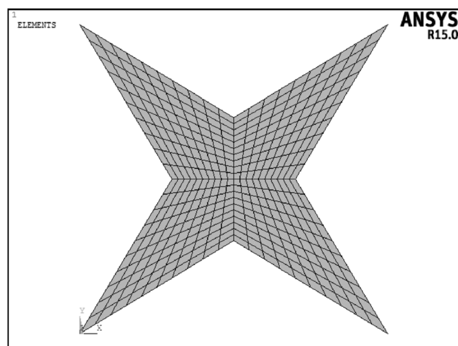


图 4-36　完成 Amesh

划分完毕后，应删除之前连接形成的辅助直线，路径为 Main Menu>Preprocessor>Meshing>

Mesh>Areas>Mapped>Del Concats>Lines。

4.4.2 多面体的映射网格划分

体映射网格划分，要将几何体全部划分为六面体单元，必须满足下列条件。

- 该体的外形为块状（6 个面）、楔形或棱柱（5 个面）、四面体（4 个面）。
- 体的对边必须划分相同数目的单元，或其划分符合过渡网格要求的划分条件。
- 如体为棱柱或四面体，则三角形面上的单元数必须为偶数。

为了方便读者操作，这里依然以 2.1 节中的图形为例。单元类型设为 Solid65。

如图 4−37 所示为 8 个侧面+顶面+底面的十面体，根据要求，必须为四、五、六面体才可以进行体映射。

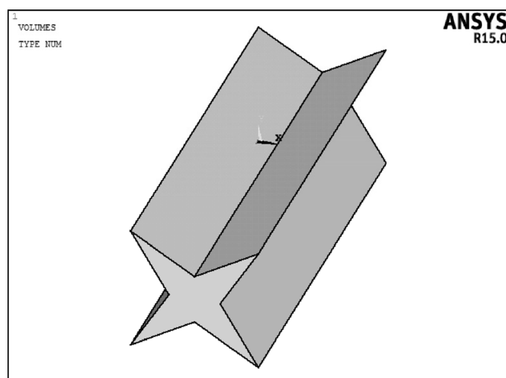


图 4−37 十面体

在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Concatenate>Areas 命令，弹出 Concatenate Areas 对话框。选择两个面，将其合并即可，如图 4−38 所示。依次合并相邻侧面，使其最终合成 4 个侧面，此时再进行 Mapped 即可。划分效果如图 4−39 所示。

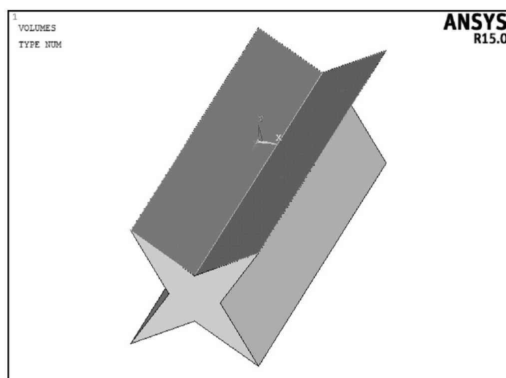


图 4−38 合并两面

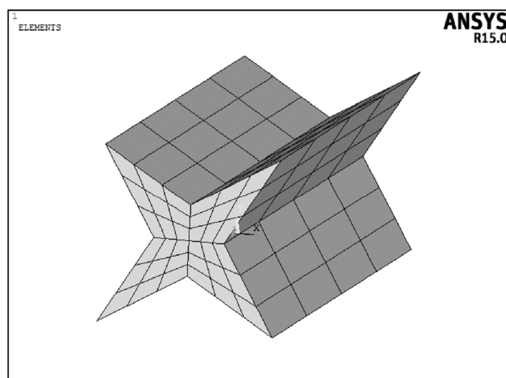


图 4−39 划分结果

4.5 扫掠网格划分 Sweep

除采用自由网格划分和映射网格划分外，对于 3D 几何体，还可采用“扫掠（Sweep）网格划分”。

4.5.1 体扫掠基本知识（Sweep）

体扫掠网格划分就是从源面（如边界面）网格扫掠整个体生成体单元。如果源面网格由四边形网格组成，则扫掠生成的均为六面体单元；如果源面网格由三角形网格组成，则扫掠生成的均为楔形体单元；如果源面网格由四边形和三角形网格组成，则扫掠生成六面体和楔形体单元。

划分体扫掠网格，要求几何体具有一对拓扑结构相同的源面（Source Area）和目标面（Target Area）（源面与目标面允许形状不同，但可能导致扫掠失败）并且源面与目标面的对应顶点之间都用一条棱线相连，即是一个柱体或旋转体几何模型。

扫掠体网格划分算法是：首先给源面划分面网格，自动进行，不需要事先人为划分面网格，然后沿柱体或旋转体棱线扫掠贯穿整个柱体或旋转体生成多层体网格（三棱柱体单元和六面体单元）。

4.5.2 体扫掠的操作步骤与使用条件

在执行体扫掠之前，应按下述步骤进行操作。

1）切分体满足扫掠网格划分条件。如果体的拓扑关系属下述情况则不能进行扫掠网格划分：

- 有内腔，即体内存在一个连续封闭的边界。
- 源面与目标面不是相对面，即 SRCA 和 TRGA 不是对应的面。
- 体内存在一不穿过源面和目标面的孔洞，如平行于此两面的孔洞。

2）定义合适的 2D 和 3D 单元类型。如果对源面进行网格划分，并拟扫掠成六面体单元，则必须定义 2D 和 3D 的单元类型，以能够划分相应的单元。并且 2D 单元和 3D 的单元类型宜相互协调，例如，均为二次单元等。

3）设置扫掠方向的单元数目或单元尺寸。

4）定义源面和目标面。为扫掠网格划分指定源面和目标面。如果不指定源面或目标面，ANSYS 将自动确定源面和目标面，如果自动确定失败，将停止扫掠划分。如果有多个体进行扫掠网格划分，多于一个源面或目标面的设置将被忽略。

5）对源面、目标面或侧面进行网格划分。扫掠前面的网格划分不同当然影响到扫掠生成的单元网格。如果不进行任何面的网格划分，系统则自动对其进行面的网格划分，然后再进行扫掠网格划分。

- 如不对面划分网格，则 ANSYS 采用 MSHAPE 命令的设置对面进行网格划分。
- 如果用 KSCON 命令设置源面网格划分，则应对源面先划分网格。
- 如果有硬点存在，且没有划分面网格，则不能进行扫掠网格划分。
- 如果源面和目标面都划分了网格，则其必须是匹配的，否则不能进行扫掠网格划分。源面和目标面的网格不必是映射网格。

为了方便读者，此处仍使用之前建立的简单模型进行实例网格扫掠。通过第 2 章 2.3 节的建模方法，得到如图 4-40 所示的模型。

1）进入前处理器，指定单元类型为 SOLID186。

2）指定材料属性，EX=2.07E11Pa，PRXY=0.3，DENS=7800。

3）在主菜单中选择 Preprocessor>Meshing>Mesh>Volume Sweep>Sweep Opts 命令，弹出如图 4-41 所示的 Sweep Options 对话框。勾选第二项 Tet mesh in nonsweepable volumes，单击 OK 按钮完成。

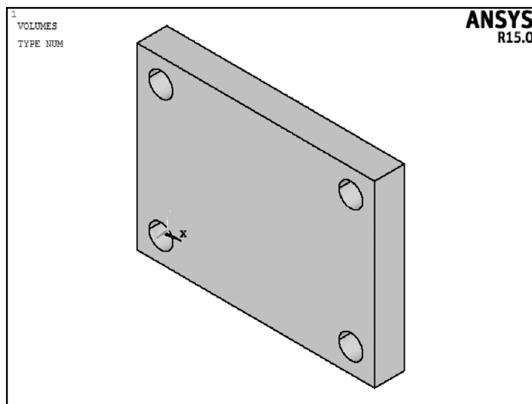


图 4-40　待划分模型

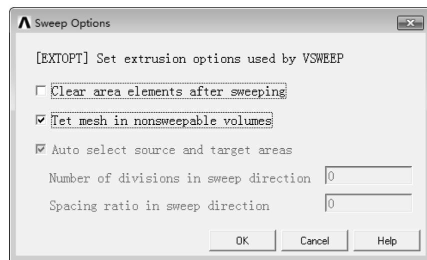


图 4-41　Sweep Options 对话框

4）打开 Mesh Tool 工具，选择 Hex/Sweep 与 Sweep，在下拉列表中选择 Pick Src/Trg，单击 Sweep，弹出拾取扫掠对象对话框，选择要扫掠的实体，如图 4-42 所示。

5）单击 OK 按钮，在工作区中拾取源面，如图 4-43 所示。

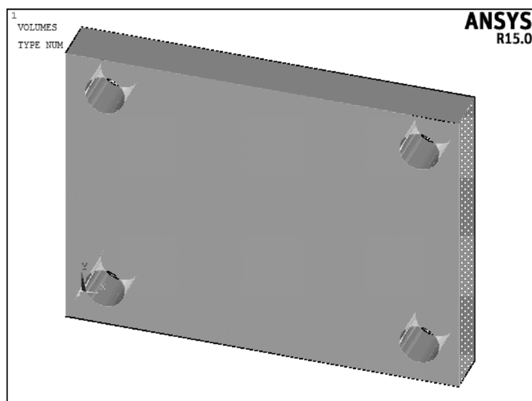


图 4-42　选择扫掠对象

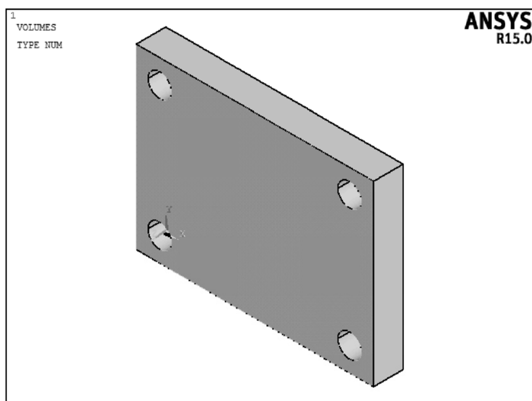


图 4-43　拾取源面

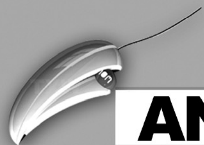
6）单击 OK 按钮，拾取目标面，如图 4-44 所示，单击 OK 按钮。扫掠完成的网格如图 4-45 所示。

请读者参考上述步骤，完成与上文对称的实体的扫掠操作。

技巧：

如果体扫掠网格划分因单元形状差而失败，可考虑如下对策：

- 如果没有指定源面和目标面，则指定之并重新执行扫掠划分。
- 交换源面和目标面，并重新执行扫掠划分。
- 另选一组完全不同的源面和目标面，并重新执行扫掠划分。
- 使用单元形状检查工具。
- 采用光滑处理，并重新执行扫掠划分。



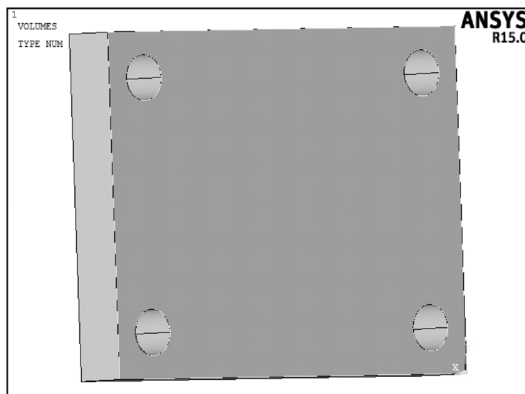


图 4-44　选择目标面

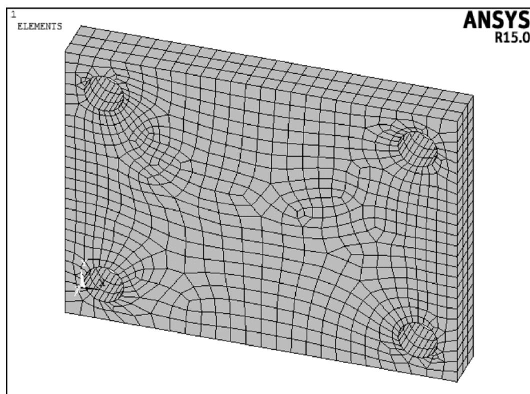


图 4-45　扫掠生成的有限元模型

4.6　本章小结

本章系统地讲解了 ANSYS 软件网格划分功能。网格划分之前，有两大项工作需要完成，一个是单元类型及材料属性等设置与赋值，一个是网格尺寸及划分形状、划分方法的确定。

单元类型的确定可以影响整个计算的正确性。在有限元数值求解中，单元的等效节点力、刚度矩阵、质量矩阵等均用数值积分生成，连续体单元以及壳、板、梁单元的面内均采用高斯（Gauss）积分，而壳、板、梁单元的厚度方向采用辛普生（Simpson）积分。辛普生积分点的间隔是一定的，沿厚度分成奇数积分点。由于不同单元的刚度矩阵不同，采用数值积分的求解方式不同，因此实际应用中，一定要采用合理的单元来模拟求解。

有限元分析的精度和效率与单元的密度和几何形状有着密切的关系，按照相应的误差准则和网格疏密程度，避免网格的畸形。在网格重划分过程中常采用曲率控制、单元尺寸与数量控制、穿透控制等控制准则。

映射划分和扫掠划分方法对模型几何形状有要求，因此，在建立模型时就要想好使用哪一种划分方法，选择合适的几何建模形状。



第 5 章　模型加载及求解分析

完成了网格的生成后，即获得了可用于计算的有限元模型。接下来就可以开始对模型施加相应的荷载与约束，进行求解。合适的加载将能够更好地模拟实际情况，正确反应实际结构的受力特征；而求解方式是否选择合适将直接影响到求解的精度和所花费的时间，甚至是否收敛。

本章将介绍荷载与加载方式的种类，施加约束及外荷载的方法，求解的控制方法，荷载步的设置，求解方法的操作等。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 加载方式的种类。
- 了解各加载方式的特点及应用范围。
- 掌握施加约束及荷载的方法。
- 掌握求解方式的控制设置。

5.1　加载的基础知识

ANSYS 中施加荷载有两种方式，即单步荷载加载与多步荷载加载。所谓单步加载就是把所有的荷载一次加齐后求解，是与时间无关的荷载；多步加载即荷载被分配在不同的荷载步中进行加载，可以分析时变的工况。

5.1.1 荷载的种类

ANSYS 中的荷载分为 6 类。

- 自由度约束（DOF，Degrees of Freedom）：将某个自由度用一已知值固定。在结构分析中约束被指定为位移边界或对称边界，在热分析中温度和热通量平行的边界条件，在电磁分析中可以是磁势等。
- 集中荷载（Concentrated Loads）：施加于模型节点上的集中荷载。在结构分析中，可以在关键点或节点上指定力、力矩、位移，在热分析中可以是热导率，在电磁分析中可以是磁流段等。
- 面荷载（Surface Loads）：施加于某个表面上的均布或按照一定的规则分布的荷载。在结构分析中可以是压力、位移，在热分析中可以是热对流，电磁分析中可以是 Magnetic Maxwell Surfaces 等。
- 体积荷载（Body Load）：作用在体积或场域内的荷载。在热分析中可以是体积膨胀、内生成热、电磁分析中可以是磁流密度（Current Density）等。
- 惯性荷载（Inertia Loads）：由物体的惯性引起的惯性力，ANSYS 中的重力即以此方式设置。

● 耦合场荷载（Coupled-field Loads）：将一种分析结果作为另一种分析的荷载。例如，热分析得到的热应变可以作为结构分析的荷载。

若按照学科不同，ANSYS 可以加载的荷载也可分为如下 5 类。

● 力场：位移、速度、加速度、力、热应变、重力。
● 热场：温度、热流率、对流、内部生成热、无限大表面。
● 磁场：磁势、磁通量、磁流段、电流源密度。
● 电场：电压、电流、电荷、电荷密度、无限大表面。
● 流场：速度、压力。

5.1.2 荷载步

ANSYS 加载过程会涉及几个概念：荷载步（Load Steps）、荷载子步（Substeps）、斜坡荷载（Ramped Loads）、阶跃荷载（Stepped Loads）、时间（Time）、时间步（Time Step）、平衡迭代（Equilibrium Iterations）。以下对这些概念进行简要介绍，在今后的叙述中将会经常遇到这些概念。这些概念是分析求解的基本组成部分，读者应注意在实践中加深理解，不要拘泥于死记术语。

（1）荷载步（Load Steps）、荷载子步（Substeps）、平衡迭代（Equilibrium Iterations）

荷载步是为求解而定义的荷载配置，可根据荷载的历程（时间与空间上）在不同的荷载步内施加不同的荷载。在时间上，ANSYS 支持斜坡荷载（Pamped Loads）与阶跃荷载（Stepped Loads），并以不同的荷载步表示。

荷载子步是某个荷载步内的求解点（由程序定义荷载增量），不同分析中荷载子步有不同的目的。例如，在瞬态分析中使用子步可以得到较小的积分步长，以满足瞬态时间积累法则。

平衡迭代是在给定子步正数了收敛而进行的附加计算。在非线性分析中，平衡迭代为一种迭代修正具有重要的作用，迭代计算多次收敛后得到该荷载子步的解。

（2）斜坡荷载（Ramped Loads）、阶跃荷载（Stepped Loads）

当一个荷载步中设置一个以上子步时，就必须定义荷载是斜坡或阶跃荷载，如图 5-1 所示。

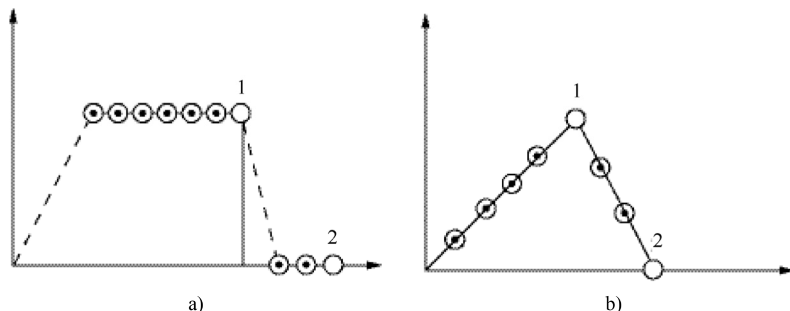


图 5-1　阶跃荷载与斜坡荷载

a) 阶跃载荷　b) 斜坡载荷

斜坡荷载是指在每个荷载子步内，荷载逐渐增加，在该荷载步结束时达到全值。

阶跃荷载是指将荷载全值施加在第一个子步，其余子步内保持不变。

（3）时间（Time）、时间步（Time Step）

在所有静态与稳态分析中，不管与时间是否真实相关，ANSYS 都使用时间作为跟踪参数。在所有的情况下，时间可以作为一个计数器，总是单调递增的。

瞬态分析或与速度（速率）有关的静态分析中，时间代表了通常意义上的时间，可通过小时、分、秒来表示，在指定荷载历程时在每个荷载步终点给时间赋值。

对与于速度（速率）无关的静态分析中，时间仅仅成为荷载步与子步的计数器，每一个荷载步与子步都与一个时间点对应，故子步也称为时间步。此时的时间可以为任意单位，程序会在默认情况下给时间自动赋值。

当采用弧长求解法时，时间等于荷载步开始的时间值加上弧长荷载系数的数值，此时的时间可以不单调递增。

荷载步和子步都与时间点对应，平衡迭代就是为收敛在给定的时间点上进行迭代求解的方法。

5.1.3 加载方式类型及特点

在 ANSYS 程序中，加载方式总体上有两种：用户既可以把荷载施加在实体模型（关键点、线、面、体等）上，也可以施加在有限元模型（结点、单元）上。

提示：如果荷载施加在几何模型上，ANSYS 在求解前先将荷载转化到有限元模型上。

（1）施加在实体模型上

优点：

- 模型荷载独立于有限元网格之外，这样就不必因为网格重新划分而重新加载。
- 通过图形拾取来加载时，因为实体较少，所以施加荷载简易。

缺点：

- 不能显示所有的实体模型荷载。
- 施加关键点约束的扩展时，在两个关键点施加的约束会扩展到关键点之间的直线上所有的节点上，有时这种约束并不是实际的约束情况，因此在使用扩展约束时，在关键点上施加约束要特别小心。

（2）施加在有限元模型上

优点：

- 约束可以直接施加在节点上，所以扩展约束没有影响。
- 荷载可以直接施加在节点上。

缺点：

- 任何对于有限元网格的修改都会使已施加的荷载无效，需要删除先前的荷载并在新网格上重新施加荷载。
- 不方便处理线荷载和面荷载，因为原来施加在一条线上的荷载需要逐个结点来拾取，原来施加在一个面上的荷载需要逐个单元来拾取，非常麻烦。

（3）加载步骤

- 选择荷载形式：如 Displacement（位移），Force/Moment（力和力矩），Pressure（压力）、Temperature（温度）等。
- 选择加载的对象：如 On Keypoints、On Lines、On Areas、On Nodes、On Element 等。

● 指定荷载的方向和数值。

5.2 施加约束

不同的学科可被约束的自由度不同，总结各学科的自由度如表 5-1 所示，便于读者参考。

表 5-1 各学科中可约束自由度

学 科	自由度名称	标 识 符
结构分析	平移/旋转	UX、UY、UZ/ROTX、ROTY、ROTZ
热分析	温度	TEMP
磁分析	矢量势/标量势	AX、AY、AZ/MAG
电分析	电压	VOLT
流体分析	速度/压力/紊流动能/紊流扩散速率	VX、VY、VZ/PRES/ENKE/ENDS

自由度约束可以施加于节点、关键点、线、面上，删除与施加的命令整理如表 5-2 所示，方便读者查阅。具体命令的使用方法将在 APDL 程序化语言中进行专题讲解。

表 5-2 约束自由度的命令

施 加 位 置	基 本 命 令	附 加 命 令
节点	D、DDELE、DLIST	DSYM、DSCALE、DCUM
关键点	DK、DKDELE、DKLIST	
线	DL、DLDELE、DLLIST	
面	DA、DADELE、DADLIST	
转换	SBCTRAN	DTRAN

在流体分析中，可在线、面上施加速度、压力、温度和紊流量。

在线的端点和面的边上，可以根据判断施加边界条件。

在结构分析中，DOF 约束中相应的自由度有平移和旋转，共有 6 个，即 UX、UY、UZ（X、Y、Z 方向平动自由度）及 RTOX、RTOY、RTOZ （X、Y、Z 方向的转动自由度），它可以施加在线、面、关键点、节点上。位移方向与总体坐标轴正向相同时取正值，否则取负值。

施加约束的路径为 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement，如图 5-2 所示。

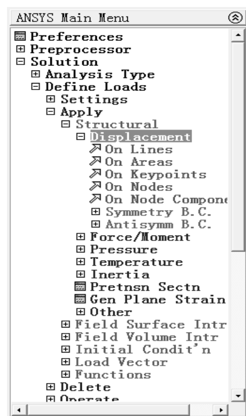


图 5-2 施加自由度约束路径

5.2.1 在关键点（或节点）上加载位移约束

在关键点施加约束：

GUI：Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Keypoints。

在节点施加约束：

GUI：Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes。

以节点上施加位移为例，通过上述路径选择要约束的节点，单击 OK 按钮，弹出 Apply U，ROT on Nodes 对话框，如图 5-3 所示。

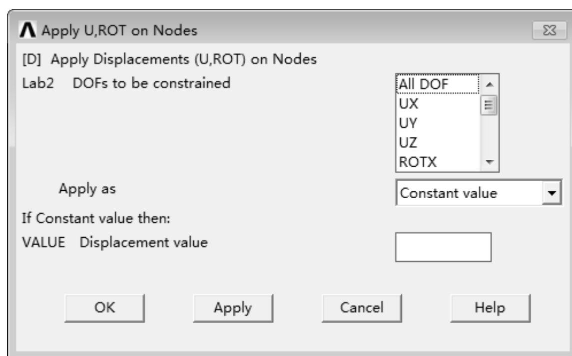


图 5-3 Apply U，ROT on Nodes 对话框

对话框右侧栏中为自由度名称，其中 All DOF 为约束所有 6 个自由度，UX，UY，UZ 为 3 个方向的平动自由度，而 ROTX，ROTY，ROTZ 为 3 个转动自由度。VALUE 输入框中可以输入自由度的值，默认为 0。

技巧：通过输入非零的实数，可以对指定节点施加位移荷载，这在后面的实例问题的分析中会用到。

提示：在关键点上施加自由度约束与在节点上施加约束类似。

5.2.2 在线（或面）上加载位移约束

GUI：Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines（或 On Areas）。

与节点（或关键点）约束不同的是，对线和面约束的自由度最多只有 3 个，即 3 个平动自由度，如图 5-4 所示。其他步骤相同。

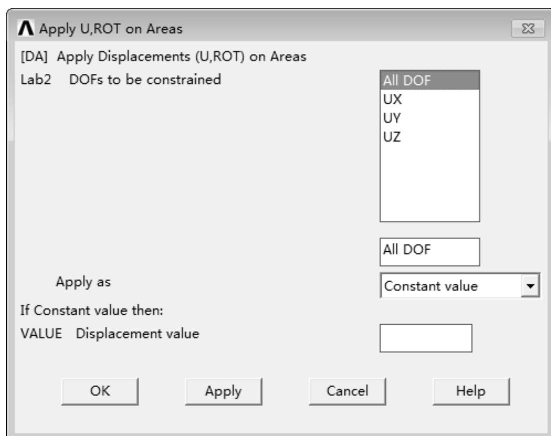
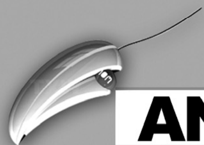


图 5-4 Apply U，ROT on Areas 对话框



在位移约束中还有两个非常重要的约束，就是施加在对称面上的对称约束和反对称约束。

对称约束：限制对称面内所有节点的两个方向旋转自由度，同时限制了垂直于对称面的位移自由度。路径为 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Symmetry B.C.>On Areas。

反对称约束：限制了对称面内所有节点在对称面内的两个方向位移自由度，同时限制了垂直于对称面的旋转自由度。路径为 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Antisymm B.C.>On Areas。

如图 5-5 所示为对称与反对称约束示意图。

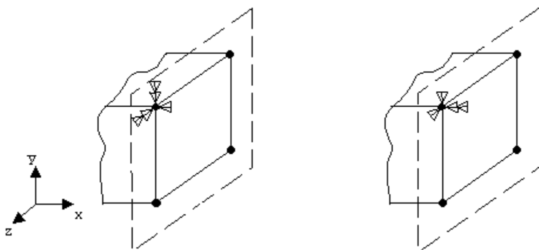


图 5-5　对称与反对称约束示意图

如图 5-6 所示为可应用对称和反对称的典型问题示例。

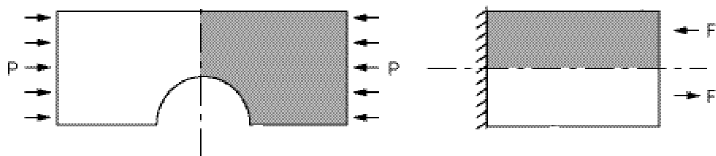


图 5-6　对称与反对称示例

技巧：*在对称模型的简化分析中，经常采用 1/4、1/2 模型，这时在对称面上应用对称或反对称约束是非常方便的。*

5.2.3 耦合

与自由度约束模型中确定的节点一样，耦合可以建立节点间的位移关系。

耦合是使一组节点具有相同的自由度。一般有如下特点。

- 每次耦合设置只能对一个自由度标识，如 UX、TEMP 等。
- 可同时对任意节点数进行耦合。
- 耦合设置中任意实际的自由度方向在不同的节点上可能是不同的。
- 耦合设置只将主自由度保留在分析矩阵中，而其他从自由度将被删除。
- 对进行过耦合自由度设置的节点进行加载时，荷载将作用在主自由度上。

典型的耦合自由度应用有下列 3 种。

- 模型命令对称性时用于施加对称性条件。由于结构的对称性，某些平面分析过程中始终保持在一个平面内，即可进行耦合。
- 在两个重合节点间形成销、铰链、万向节、滑块连接等。如为了模拟铰链，将同一个位置的两个不同节点的称动自由度耦合起来，而不耦合转动自由度，即形成铰链。
- 模拟无摩擦的界面。如果两个界面上节点一一对应，两表面保持接触，可忽略摩擦且分析是几何线性的，则可通过仅耦合垂直于界面的自由度来模拟接触。使用耦合自由度模拟无摩擦的界面的方法分析仍然是线性的、无间隙收敛性问题等优点。

耦合定义方法如下。

在选定的节点处生成面并修改耦合自由度集，可以在主菜单选择 Preprocessor> Coupling/Ceqn> Couple DOFs 命令，选择要耦合的节点单击 OK 按钮，弹出图 5-7 所示的 Define Coupled DOFs 对话框，用户根据需要依次进行设置即可。

也可以采用 CP 命令来进行操作。命令的详细方法见 APDL 专题。

修改已有的耦合自由度集。

在主菜单中选择 Preprocessor> Coupling / Ceqn> Coincident Nodes 命令，弹出如图 5-8 所示的 Couple Coincident Nodes 对话框。



图 5-7 Define Coupled DOFs 对话框

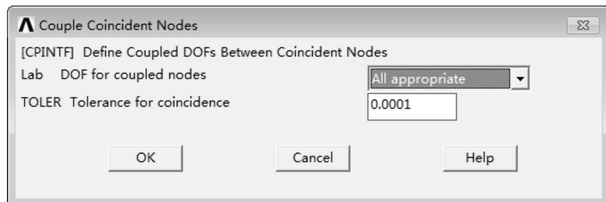


图 5-8 Couple Coincident Nodes 对话框

用户输入要设定的容差值单击 OK 按钮即可。

一旦有了一个或多个耦合集，用户可以使用相同的节点号但不同的自由度标识符的耦合集。路径如下。

在主菜单选择 Main Menu> Preprocessor> Coupling / Ceqn> Gen w/Same Nodes 命令，弹出图 5-9 所示的 Generate Coupled DOF Sets w/Same Nodes 对话框，根据提示完成操作即可。

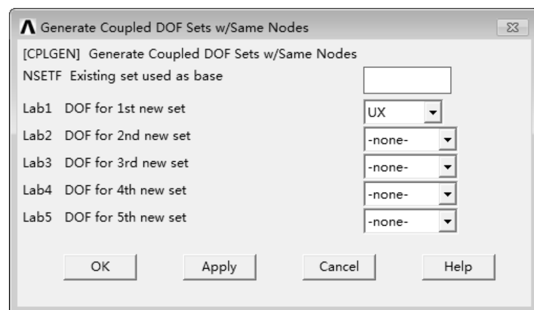
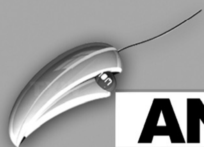


图 5-9 Generate Coupled DOF Sets w/Same Nodes 对话框



相应的，也可以从已有的耦合自由度集生成新的耦合自由度集，新生成的耦合集与已有的耦合集具有相同的自由度标识符但不同的节点号，方法如下。

在主菜单选择 Main Menu> Preprocessor> Coupling / Ceqn> Gen w/Same DOF 命令，弹出图 5-10 所示的 Generate Coupled DOF Sets w/Same DOF 对话框，根据提示完成操作即可。

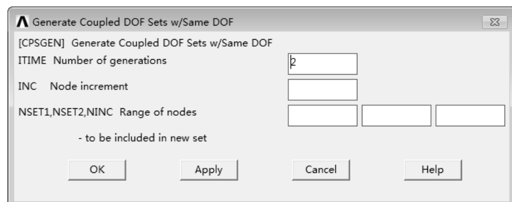


图 5-10 Generate Coupled DOF Sets w/Same DOF 对话框

5.2.4 约束方程

约束方程定义了节点自由度之前的线性关系。它提供了比耦合更通用的数学形式，如下式所示。

$$\text{Constant} = \sum_{i=1}^{n} (\text{Coefficient}(i) \times \text{U}(i))$$

其中，U(i)是自由度，n 是方程中项的编号。

约束方程可以将任意节点的任意自由度进行组合，且任意实际的自由度方向在不同的节点上可能不同。常用建立约束方程的思路有：

- 直接定义约束方程。
- 生成刚性区域。
- 连接疏密不同的已划分网格。

（1）直接定义约束方程

通过 GUI 界面操作，在主菜单中选择 Preprocessor> Coupling / Ceqn> Constraint Eqn 命令，在弹出的如图 5-11 所示的 Define a Constraint Equation 对话框中，根据提示操作，即可直接定义约束方程。

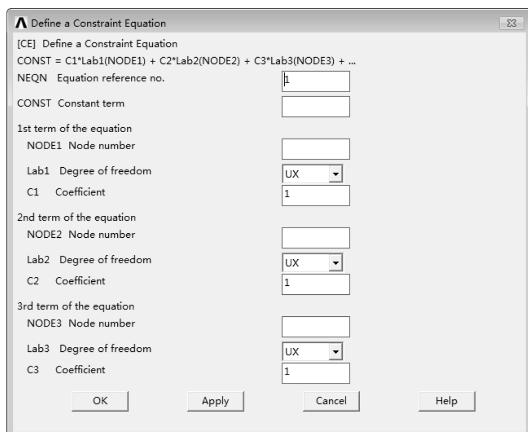


图 5-11 Define a Constraint Equation 对话框

例如，在图 5-12 所示的示例中，力矩传递由 BEAM 单元与 PLANE 单元的连接完成，两者约束方程可定义如下。

$$ROTZ_2 = (UY_3 - UY_1)/10$$

$$0 = UY_3 - UY_1 - 10 \times ROTZ_2$$

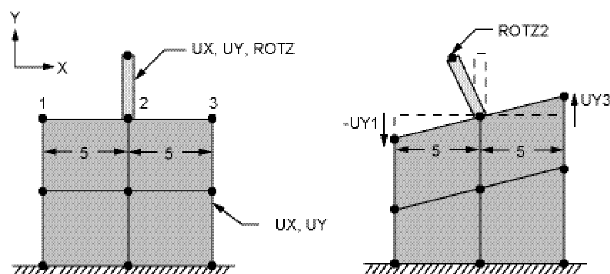


图 5-12　连接不同的单元类型

（2）生成刚性区域

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Coupling / Ceqn> Rigid Region 命令，选择主节点与从节点，在弹出的如图 5-13 所示的 Constraint Equation for Rigid Region 对话框中根据提示操作。

（3）连接疏密不同的已划分网格

在接触面生成约束方程，可将一个网格较疏的区域的已选节点与一个网格较密的区域的已选单元连接起来生成约束方程。方法如下。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Coupling / Ceqn> Adjacent Regions 命令，在弹出的如图 5-14 所示的 Constraint Equations Connecting Adjacent Regions 对话框中根据提示操作即可。

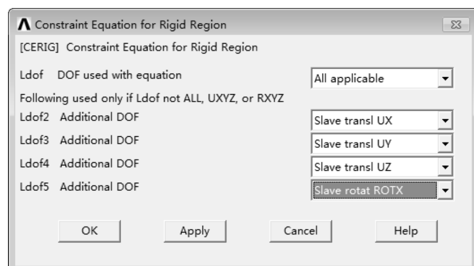


图 5-13　Constraint Equation for Rigid Region 对话框

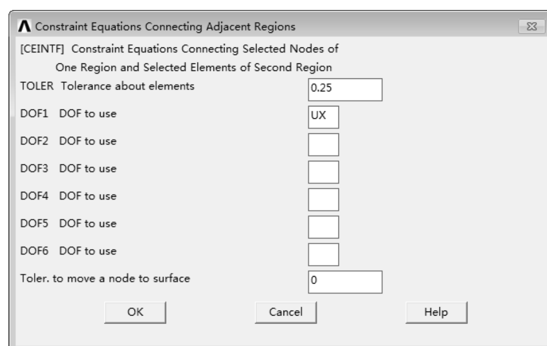


图 5-14　Constraint Equations Connecting Adjacent Regions 对话框

ANSYS 中可以设置耦合约束来模拟铰链、无摩擦滑动器、万向节、无摩擦接触面等问题。一个耦合约束是设置一组被约束在一起，有着相同大小但数值未知的自由度。

GUI：Preprocessor>Coupling/Ceqn>Couple DOFs。

对于需要在同一位置的所有节点之间自动生成耦合关系的情况，可通过以下路径实现：

GUI：Preprocessor>Coupling/Ceqn>Coincident Nodes。

5.3 施加荷载

荷载的施加可以同时使用实体模型加载与有限元模型加载两种方式，用户应根据分析对象的特点，合理选择，尽量保证加载过程简洁清晰，以利于后续分析。

5.3.1 集中荷载

每个学科中可用的集中荷载都有各自的标识符，整理归类于表 5-3 中，方便用户查阅。

表 5-3 不同学科中的集中荷载

学 科	荷 载 名 称	标 识 符
结构分析	力/力矩	FX、FY、FZ/MX、MY、MZ
热分析	热流速率	HEAT
磁分析	Current Segments/磁通量/电荷	CSGX、CSGY、CSGZ/FLUX/CHRG
电分析	电流/电荷	AMPS/CHRG
流体分析	流体流动速率	FLOW

在 GUI 界面中，可以在主菜单中选择 Preprocessor> Define Loads> Apply> Load Type> On Objects 命令、Solution> Define Loads> Apply> Load Type> On Objects 命令，均可以施加荷载。上述的 Load Type 可以选择结构分析、热分析等，On Objects 可以选择需要施加荷载的对象为节点、关键点等。

5.3.2 分布荷载

每个学科中可用的分布荷载都有各自的标识符，整理归类于表 5-4 中，方便用户查阅。

表 5-4 不同学科中的分布荷载

学 科	荷 载 名 称	标 识 符
结构分析	压力	PRES
热分析	对流/热流量/无限表面	CONV/HFLUXI/NF
磁分析	麦克斯韦表面无限表面	MXWFINF
电分析	麦克斯韦表面/表面电荷密度/无限表面	MXWF/CHRGS/INF
流体分析	流体结构界面/阻抗	FIS/IMPD
所有学科	超级单元荷载矢	SELV

ANSYS 按适当方式将压力施加于轴对称梁单元或壳单元的内外表面。对于分层壳单元，面内压力荷载矢量施加在节点平面上。KEYOPT11 决定壳内节点平面的位置。当用平面单元代表二重曲面时，子午半径函数的值是不精确的。

以结构分析为例，表面荷载就是施加的压力。当表面荷载方向指向物体内部时取正值，否则取负值。ANSYS 不仅可以将表面荷载施加在线上、面上，还可以将表面荷载施加在节点、单元以及梁上。

分布荷载总体上分为均布荷载和非均布荷载，如图 5-15 所示。

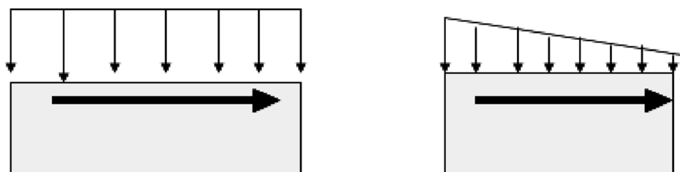


图 5-15 分布荷载

（1）在线，面上施加分布荷载

现在以面上的分布荷载为例进行说明。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure> On Areas，拾取要添加压力的面，弹出对话框如图 5-16 所示。在第一个下拉列表框中有 3 个选项。

Constant：均布荷载，若选择此项，则在接下来的 VALUE 输入栏中输入均布荷载的值即可。

用户也可以通过定义荷载表（数组荷载）施加非均布的荷载。

New table：建立新的荷载表，选择此项，单击 OK 按钮，弹出对话框如图 5-17 所示，输入新的荷载表名，单击 OK 按钮弹出新的对话框。

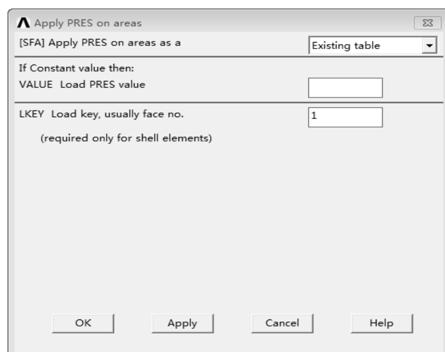


图 5-16 Apply PRES on areas 对话框

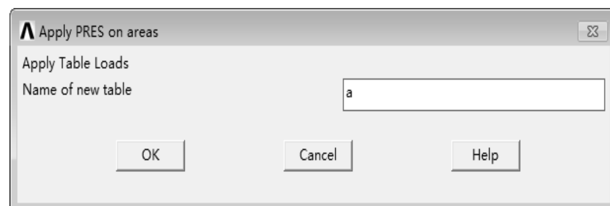


图 5-17 定义压力数组

在如图 5-18 所示对话框中，可以定义列表的行列变量属性。对应的数组可以从已有文件中读取（Read from file）也可以在图形窗口中进行定义，如图 5-19 所示。

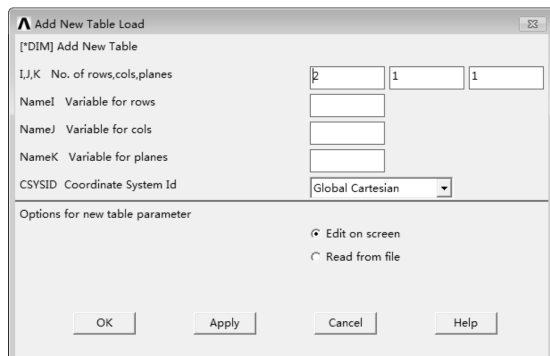


图 5-18 添加数组荷载

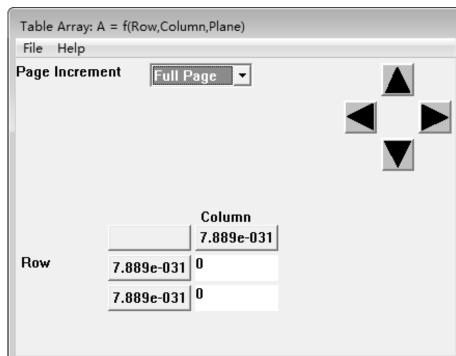


图 5-19 定义数组荷载

Existing table：选择此项，则可以直接调用已定义好的荷载列表。

注意：

ANSYS 中的线是有方向的，相当于从起始关键点到终止关键点的一条矢量线，这在很多分析中非常重要。观察方向在实用菜单 Plot Ctrls>Symbol 中设置，勾选 Line direction 即可。

对于非线性的函数分布荷载，可以通过分段近似线性加载的方法，或者通过不同节点处加载不同集中力的方法进行模拟（使用数组荷载定义）。

（2）在单元上施加分布荷载

ANSYS 中可以在单元上直接施加分布荷载。

路径为 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Elements，拾取待加荷载的单元，单击 OK 按钮，弹出 Apply PRES on elems 对话框，如图 5-20 所示。

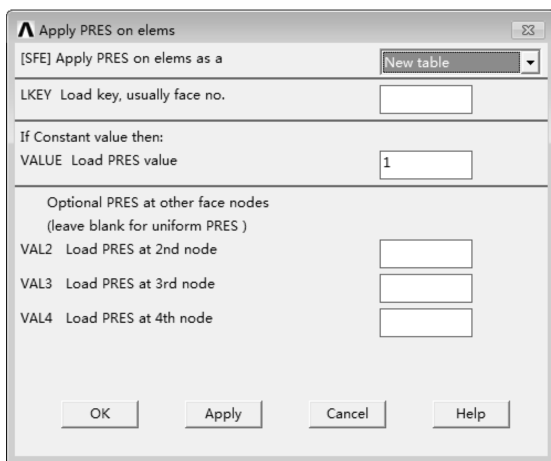


图 5-20　Apply PRES on elems 对话框

如果单元上的荷载是均布的，可以只在 VALUE 输入框中输入荷载值即可；如果不是均布荷载，则需要输入其他节点上的荷载值。各节点之间的荷载分布，如图 5-21 所示，按线性变化处理。

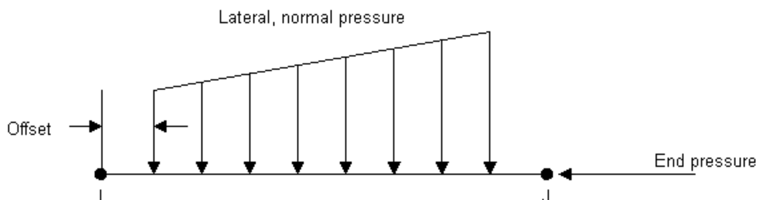


图 5-21　梁单元分布荷载示例

有时用户可能会需要施加一个所用单元不能接受的面荷载。例如在结构实体单元上施加均布节向（或任何非法向的）压力，在热分析实体单元上施加辐射指定等。这些情况下，可以使用表面效应单元覆盖要施加荷载的表面，并利用这些单元作为管道施加所需的荷载。

可供选用的表面效应单元为：

平面模型可用 SURF151、SURF153、SURF152，三维实体模型可用 SURF154、SURF156、SURF159。

5.3.3 体荷载

各学科可以施加的体荷载如表 5-5 所示。

表 5-5 不同学科的体荷载

学 科	体荷载载	标 识 符
结构分析	温度	TEMP
	频率	FREQ2
	能量密度	FLUE
热分析	热产生率	HGEN
磁场分析	温度	TEMP
	电流密度	JS
	虚位移	MVDI
	压降	VLTG
电场分析	温度	TEMP
	体电荷密度	CHRGD
流体分析	热产生率	HGEN
	受力密度	FORC

对模型施加体荷载有以下几种方法。

- 在主菜单中选择 Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> load type> On Nodes 命令。
- 在通用菜单中选择 List> Loads> Body> On Picked Elems 命令。
- 在主菜单中选择 Solution> Define Loads> Apply> load type> On Keypoints 命令。
- 在通用菜单中选择 List> Loads> Body> On Picked Lines 命令。
- 在主菜单中选择 Solution> Define Loads> Apply> load type> On Volumes 命令。

（1）为单元定义体荷载

ANSYS 的 BFE 命令可以逐个对单元施加体荷载，然而，对应需要施加多个荷载值的单元，可以在一个单元的多个位置指定体积荷载。所使用的位置随单元类型的不同而异，默认位置也随单元类型的不同而异。

对于平面实体单元（PLANE）与空间实体单元（SOLID），体荷载的位置通常位于单元的角点，如图 5-22 所示。

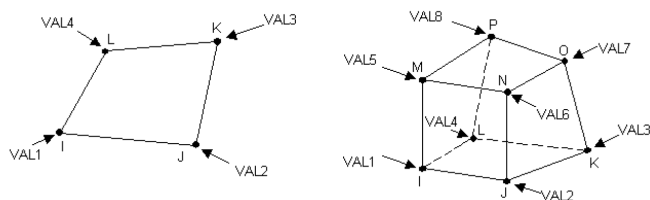


图 5-22 PLANE 单元与 SOLID 单元的体荷载施加位置

对于壳（SHELL）单元，体荷载的位置通常位于顶面与底面的“伪节点”上，如图 5-23 所示。

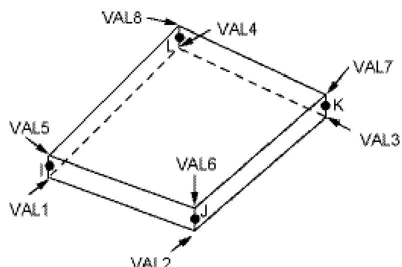


图 5-23　SHELL 单元的体荷载施加位置

对于一维单元（BEAM、LINK、PIPE 等），与 SHELL 单元类似，加载的位置通常位于所谓“伪节点”，如图 5-24 所示。

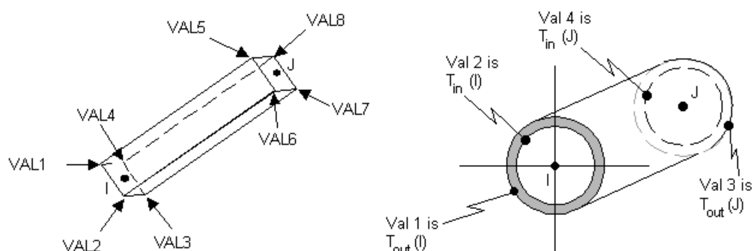


图 5-24　一维单元的体荷载施加位置

在所有情况下，如包含退化单元，必须在所有位置指定单元荷载，包括在重合节点（退化节点）处施加重复荷载值。另一个简单可用的方法是使用 BF 命令直接在节点处指定体荷载值。

（2）为关键点施定义荷载

BFK 用于对关键点施加体荷载。如果在面或体的角点处的关键点处施加体荷载，对于待转换到面或体的内部节点的荷载，所有的荷载值必须相等。如果指定了不相等的荷载，这些荷载将仅仅被转换到与关键点连线的节点上，如图 5-25 所示。

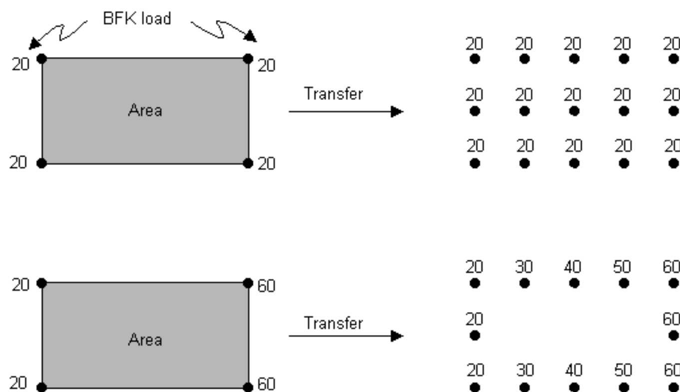


图 5-25　为关键点定义体荷载

（3）为线、面、体定义体荷载

BFL、BFA、BFV 命令分别用于为模型中被选中的线、面、体定义体荷载。需要注意的一点区别是，施加在线上的体荷载会被转换到对应的有限元模型的节点上，施加在面、体上的体荷载将会被施加到对应的有限元模型的单元上。

（4）定义均布体积荷载

定义均布荷载可以在对模型所有的节点都产生作用。常用于形成均布温度场。即结构分析中的均布温度场、瞬态分析或非线性分析中的均布起始温度，均可以由此生成。可以有如下方法用于形成均布体荷载。

- 在主菜单中选择 Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural or Thermal>Temperature>Uniform Temp 命令。
- 在主菜单中选择 Preprocessor> Loads> Define Loads> Settings> Uniform Temp 命令。
- 在主菜单中选择 Solution> Define Loads> Apply> Structural or Thermal> Temperature>Uniform Temp 命令。
- 在主菜单中选择 Solution> Define Loads> Settings> Uniform Temp 命令。
- 使用 BFUNIF 命令。

5.3.4 惯性荷载

惯性荷载仅当模型具有质量时有效，定义质量通常是通过指定密度参数进行的，也可以通过使用质量单元（如 MASS21）对模型施加质量，但通过密度的方式更为常用，也更为有效。对其他数据，ANSYS 要求质量为恒定单位。只有在下列情况下，重量密度可以用于替代质量密度。

- 模型仅用于静态分析。
- 未施加角速度、角加速度。
- 重力加速度为单位值。

在直角坐标系中，ACEL、OMEGA、DOMEGA 命令分别用于指定加速度、角速度、角加速度。

5.3.5 耦合场荷载

在多物理耦合分析时，经常要将一个场分析的结果用于另一个物理场分析的加载。例如将热分析的结果作为温度荷载加载于结构分析过程中。施加耦合场荷载有如下方法。

- ◆ 选择 Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply> load type> From source 命令。
- ◆ 选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> load type> From source 命令。
- ◆ 使用 LDREAD 命令。

5.3.6 轴对称荷载与反作用力

对约束、面荷载、体荷载和 Y 方向加速度，可以像对任何非轴对称模型上定义这些荷载一样精确地定义这些荷载。然而，对于集中荷载，则略有不同。因为这些荷载的大小、输入的力、力矩数值都是在 360° 范围内进行，例如，如图 5-26 所示，轴对称荷载被施加到一个圆管上。

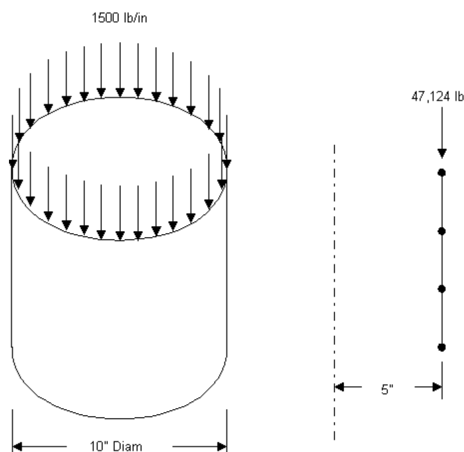


图 5-26　轴对称荷载示例

示例中的荷载按下列方式被加载到模型上，F，N，FY，-47124。轴对称结果对按对应的输入荷载相同的方式解释，即输出的反作用力、力矩等按总荷载计算。

轴对称协调单元要求其荷载以程序能作为傅里叶级数来说明的形式施加，对于这些单元，应采用如下方法。

- 选择 Main Menu> Preprocessor> Loads> Load Step Opts> Other> For Harmonic Ele 命令。
- 选择 Main Menu> Solution> Load Step Opts> Other> For Harmonic Ele 命令。

需要注意的是，要指定足够数量的约束以防止产生不是预期的刚体运动、不连续、奇异性。例如，对实心杆这样的实体结构的轴对称模型，缺少沿对称轴的 UX 约束，在结构分析中就隐含了允许形成的虚 VOIDS，如图 5-27 所示。

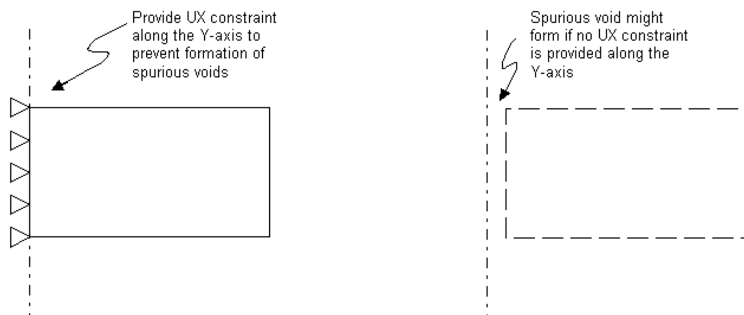


图 5-27　轴对称结构的中心约束

如果施加的荷载用于对荷载不产生任何抵抗作用的 DOF 上，即荷载作用在了完全零刚度的对象上，ANSYS 将会直接将该荷载忽略。

5.3.7 初应力荷载

在 ANSYS 中做结构分析时，初始应力可以作为一项荷载，只在静态分析与瞬态分析中被承认（线性或非线性分析均可），初始应力荷载只能在分析的第一荷载步中被施加，恒应力可以用 ISTRESS 命令定义。使用 ISFILE 命令从输入文件中获取初始应力值，为了列表或

是删除初始应力，命令变元允许初始应力被限制为具体的材料类型。

要在分层的 SHELL181 单元中指定层上施加初始应力，可以使用指定层的材料 ID 号。在初始应力命令中使用 MAT 字段可以根据层的材料 ID 号施加需要的应力，或者可以在 SHELL181 单元的所在层上施加初始应力，然后删除那些不希望有初始应力的层上的初始应力。使用“DELETE，elementID”层号命令，还可以用初始命令列表来删除分层 SHELL181 单元上指定层上的初始应力值。

初始应力功能只支持以下单元类型：PLANE2、PLANE42、SOLID45、PLANE82、SOLID92、SOLID95、LINK180、SHELL181、PLANE182、PLANE183、SOLID185、SOLID186、SOLID187、BEAM188、BEAM189。

5.3.8 由表型数组定义荷载

使用表型数组定义荷载，可以用分析的加载命令或菜单来实现，不需要为具体的荷载指定值，只需要指定表型数组的名称即可。并不是所有的边界条件都支持表型数组，支持的边界列于表 5-6 中方便读者查阅。

表 5-6 支持表型数组的边界条件

边界条件	主变量	命令
热分析		
Fixed Temperature	TIME，X、Y、Z	D，，（TEMP，TBOT，TE2，TE3，…，TTOP）
Heat Flow	TIME，X、Y、Z，TEMP	F，，（HEAT，HBOT，HE2，HE3，…，HTOP）
Film Coefficient（Convection）	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY	SF，，CONV
		SFE，，，CONV
Bulk Temperature（Convection）	TIME，X、Y、Z	SF，，，TBULK
		SFE，，，TBULK
Heat Flux	TIME，X、Y、Z，TEMP	SF，，HFLUX
		SFE，，，HFLUX
Heat Generation	TIME，X、Y、Z，TEMP	BFE，，HGEN
Uniform Heat Generation	TIME	BFUNIF，TEMP
结构分析		
Displacements	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP	D，（UX，UY，UZ，ROTX，ROTY，ROTZ）
Hydrostatic Pressure	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP	D，HDSP
Forces and Moments	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP，SECTOR	F，（FX，FY，FZ，MX，MY，MZ）
Fluid Mass Flow Rate	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP，SECTOR	F，DVOL
Pressures	TIME or FREQ，X、Y、Z，TEMP，SECTOR	SF，，PRES
		SFE，，，PRES
Temperature	TIME，X、Y、Z，TEMP	BF，，TEMP
		BFE，，TEMP
Linear Acceleration	TIME or FREQ，X、Y、Z	ACEL，ACEL_X，ACEL_Y，ACEL_Z

（续）

边界条件	主变量	命令
Translational Acceleration	TIME or FREQ，X、Y、Z	CMACEL，CMACEL_X，CMACEL_Y，CMACEL_Z
Super element Load Vector	TIME	SFE，，，SELV
磁场分析		
Current Density	TIME，X、Y、Z	BFE，，JS
电场分析		
Voltage	TIME，X、Y、Z	D，，VOLT
Current	TIME，X、Y、Z	F，，AMPS
高频电磁分析		
Current Density	TIME，X、Y、Z	BFE，，JS
流体分析		
Pressure	TIME，X、Y、Z	D，，PRES
Flow	TIME，X、Y、Z	F，，FLOW
扩散分析		
Concentration	TIME，X、Y、Z	D，，CONC
Diffusion Flow Rate	TIME，X、Y、Z	F，，RATE
FLOTRAN 分析		
Nodal DOF	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	D，，（VX，VY，VZ，PRES，TEMP，ENKE，ENDS，SP01-SP06）
Nodal DOF for ALE formulation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRES，Xr，Yr，Zr	D，，（UX，UY，UZ）
Heat Flux	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF，，HFLUX
		SFE，，，HFLUX
Film Coefficient	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF，，CONV
		SFE，，，CONV
Element Heat Generation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	BFE，，HGEN
Nodal Heat Generation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	BF，，HGEN
Nodal Body Force	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	BF，，FORCE
Radiation	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF，，RAD
		SFE，，，RAD
Fluid Volume	TIME，X、Y、Z，TEMP，VELOCITY，PRESSURE	SF，，VFRC
		SFE，，，VFRC

关于命令的详细用法，在读者学习使用命令流之前暂不进行详细说明，在后文学习 APDL 语言后，作者将为读者进行详细介绍。

定义荷载时可以选择 NEW TABLE 定义一个新表格。可以通过 Utility Menu> Parameters> Array Parameters> Define/Edit 命令来实现。

5.3.9 荷载显示与控制

（1）在图形中显示荷载

通常情况下，施加在几何实体模型上的荷载，用相应的符号显示在几何实体模型的体、面、

线或关键点上。而有限元模型上加载的荷载，则显示在节点或单元上。显示符号的设置如下：

命令：/PBC/PSF/PEF/PICE/PSYMB。

GUI：Utility Mneu>Plotcrls>Symbol。

选择 Utility>Plot>Volumes（Areas，Lines）等命令仅显示几何实体模型加载的情况；若选择 Plot>Element，则仅显示有限元模型加载情况；若选择 Plot>Multi_Plots 则显示全部加载情况。

注意：通过图形显示仅仅能够看到加载和约束的基本情况。需要知道具体的加载位置和大小，应选择主菜单中的 List>Loads 子菜单中的相关命令。

（2）荷载删除

对于已施加在几何模型上或有限元模型上的荷载，可以进行删除操作。

选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Delete>All Load Data>All Forces>On All Nodes 命令。

选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Force/Moment>命令。

5.4 设定分析类型与求解方法

在应用 ANSYS 进行实际分析时，对于大多数求解过程，需要对求解过程进行控制设置，这些设置主要包括：

- 分析类型设置。
- 求解方法基本选项设置。

求解的过程大部分是由计算机自动完成的，在完成建模和加载工作后，就可以直接进行 ANSYS 求解了。

操作路径 GUI 为 Main Menu>Solution>Slove>Current LS。

5.4.1 分析类型设置

在建模之前已经作过 GUI 参数过滤设置，目的在于隐藏无关的菜单和命令，使操作简化。

GUI：Main Menu>Preferences，弹出对话框如图 5-28 所示。

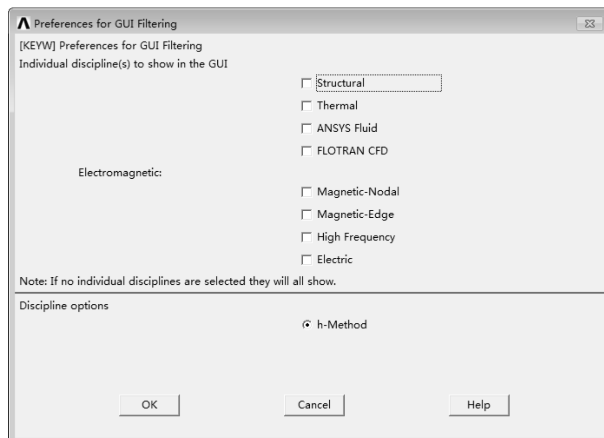


图 5-28 设置基础分析模块

在土木工程中，用得最多的是 Structural（结构分析）。

注意：结构分析种类也很多，ANSYS 默认的结构分析类型是静力分析（Static），当要改变分析类型时，如模态分析、谐分析、瞬态分析等，需要采用以下方式进行设置：

命令：ANTYPE，Antype，Status，LDSTEP，SUBSTEP。

GUI：选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 命令。

5.4.2 分析基本选项设置

求解前先设定分析类型，如图 5-29 所示。路径为 Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Type> New Analysis。

再通过路径 Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Type>Sol'n Controls>，得到如图 5-30 所示对话框，进行分析基本选项的设置。

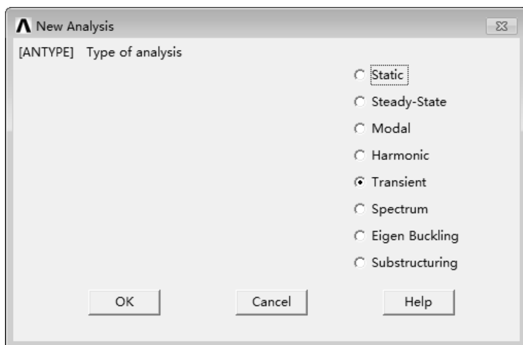


图 5-29 设置分析类型

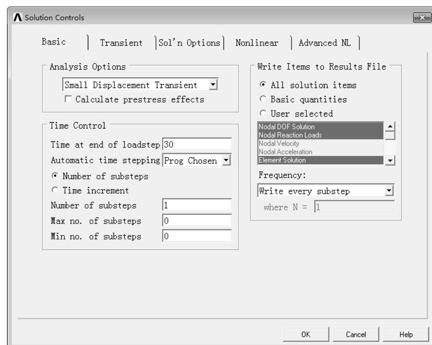


图 5-30 设置分析选项

关于图 5-30 所示的对话框需要详细介绍一下。

在 Solution Control 对话框中，有 5 个选项卡，图中所示为第一个选项卡，Basic 的界面。

- Analysis Options：设置线性/非线性问题、小变形/大变形问题等。
- Time Control：时间控制选项。这是求解控制中的一个重要部分。

ANSYS 在结构分析中，使用时间作为一个过程参数，而不论分析结果是否依赖于时间。这样做的好处是，在所有的情况下，以一个通用的“计数器”来反映分析历程。此外时间的单调增加与分析过程一致。

显然，在瞬态分析、蠕变分析中，ANSYS 的“时间”代表了实际的时间。然而在不依赖时间的静态分析或模态分析中，时间仅仅是一个识别荷载步与子步的计数器。

在时间控制选项中的“Time at end of loadstep”栏设置的就是这个时间计数器的终止时间，例如将其设置为 1。注意设为 0 或留空，则 ANSYS 使用默认时间值 1。

在设置了终止时间后，就可以设置时间子步。所谓时间子步就是将分析过程进行认为分段，使有限元方程在迭代求解过程中分段前进，最终获得目标结果的正确值。例如在 Number of substeps 栏中输入 4，则表示将时间过程等分为 4 个部分进行分段迭代，若终止时间＝1，则它等同于设置每个时间子步为 0.25。

注意：时间控制中还有一个自动时间子步选项 Automatic time stepping，如果将其打开，则 ANSYS 将会在某一个迭代子步不收敛或很难收敛的情况下自动将该子步进行二分，该设置有助于在不明确求解子步是否设置得合适得情况下使用。

5.5 荷载步文件法

一个荷载步是指边界条件和荷载项的一次设置或一种工况。若希望使用荷载步文件法求解，则需要将每一个荷载步的加载情况依次写到相应的荷载步文件中。

荷载步文件取名为 jobname.sxx，其中 xx 表示荷载步号，然后再用一条命令来读入每个荷载步文件并开始逐个求解。

5.5.1 荷载步文件的建立法

1）定义一个荷载步的边界条件和加载情况。

2）写入第一个荷载步文件，路径为 Solution>Load Step Opts>Write LS File，得到对话框如图 5-31 所示。

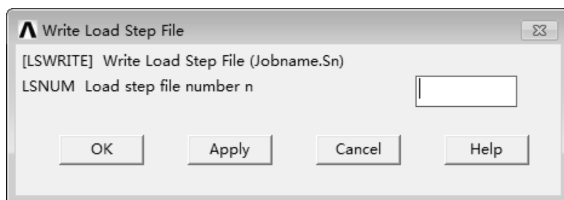


图 5-31 写荷载步文件

3）按第二个边界条件、加载情况修改模型，即定义第二个荷载步。

4）写入第二个荷载步文件，直到全部定义完毕。

5.5.2 荷载步文件法求解

用户可以在当前设置下对工作直接求解：Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

也可以用荷载步文件法求解：路径为 Solution>Solve>From LS File。

在如图 5-32 所示界面内输入荷载步文件的开始文件与终止文件的编号，并设置文件的增量即可。

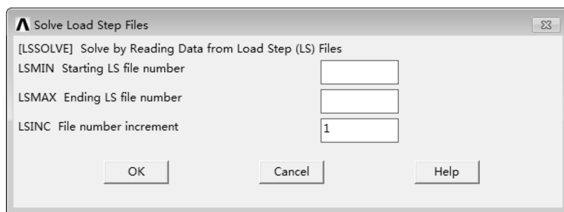


图 5-32 通过荷载步文件求解

5.5.3 荷载步文件的查看或修改、删除

对于已经生成的荷载步文件，想要进行查看与修改，删除荷载步文件的操作，有如下路径。

GUI：选择 Solution>Load Step Opts >Read LS File 命令，查看并修改文件。

GUI：选择 Solution>Define Loads>Operate>Delete LS Files 命令，删除文件。

5.6 本章小结

本章为读者介绍 ANSYS 有限元分析的加载与求解过程。本书所提到的力、荷载、边界等概念均为广义概念，不同学科中荷载的概念均不相同，位移、力、力矩、温度、电压等物理量均可以作为荷载进行施加。

在应用 ANSYS 进行实际分析时，对于大多数求解过程，需要对求解过程进行控制设置，这些设置主要包括：

- 分析类型设置。
- 求解基本选项设置。

在工程实际问题中，结构的荷载、边界条件可能存在几种工况，为让 ANSYS 自动完成全部工况的计算分析，引入了荷载步的概念和荷载步文件自动求解法。

通过本章的学习，有助于用户在以后的应用中对各种加载及求解方式进行正确而高效的选择与应用。



第 6 章 求解与后处理

所谓后处理，即完成求解后对所获得的结果数据进行分析处理。后处理可在求解完后直接进入，也可在重新进入 ANSYS 后读入文件进入后处理。

ANSYS 有两个后处理器。

1）通用后处理器 POST1：查看整个模型在各个时间点上的结果。

2）时间历程后处理器 POST26：查看整个模型上的某一点结果随时间的变化曲线。

本章学习目标

- 熟练掌握一般后处理的各项功能。
- 熟练应用时间历程后处理功能。

6.1 通用后处理

通用后处理器即 POSTl，该模块用于分析处理整个模型在某个荷载步的某个子步、某个结果序列、某特定时间或频率下的结果。

6.1.1 读入结果文件

求解过程中可以使用 OUTRES 命令指示 ANSYS 按照指定的时间间隔将选定的结果写入结果文件中，结果文件的类型取决于其分析类型。

- .rst：结构分析。
- .rth：热分析。
- .rmg：电磁分析。
- .rfl：FLOTRAN 分析。

对于 FLOTRAN 分析，文件的扩展名为.rfl，对于其他流体分析，文件扩展名为.rst 或.rsh，取决于是否给出结构自由度。

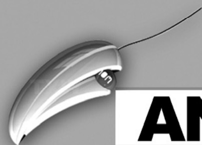
进入 ANSYS 后，再进入后处理需要将模型数据（DB）和结果数据（RST）读入到当前数据库，读入结果文件的相关操作路径汇总如下。

在 GUI 界面中选择：

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Detailed Summary 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Detailed Summary（Freq ordered）命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Results Summary 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Results Summary（Freq ordered）命令。
- 选择 Utility Menu>List>Results>Load Step Summary 命令。

根据需要读入指定荷载步的计算结果：

- 选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Load Step 命令。



- 选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Pick 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Pick（Freq ordered）命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>Next Set 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Read Results>Previous Set 命令。

通过命令流方法可以达到同样的操作结果，在 APDL 专题中将详细介绍，为方便读者查阅，现汇总相关命令如表 6-1 所示。

表 6-1　读入结果文件及其命令

命　　令	功　　能	备　　注
INRES	指定从结果文件恢复的数据	影响 SET、SUBSET 及 APPEND
FILE	指定拟读入的结果文件	对该结果文件进行后处理
SET	从结果文件中读出指定的数据组	读出并可同时缩放、插值等运算
SUBSET	为所选择的模型读入结果	需有模型数据
APPEND	从结果文件读入数据追加到当前数据库	需有模型数据
LCZERO	将数据库中的结果置零	便于多次荷载工况组合
RESUME	恢复模型数据库	通常不必使用

6.1.2 分析结果的绘图显示

分析结果可以通过绘图或者列表的形式显示。

（1）绘变形图

路径如下。

- 主菜单：Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape。
- 实用菜单：Utility Menu>Plot>Results>Deformed Shape。

通过上述路径，打开对话框如图 6-1 所示。

这里有 3 个选项：选择 Def shape only 则显示变形后的形状；选择 Def+undeformed 则显示变形后的形状以及变形前的网格；选择 Def+undef edge，则显示变形后的形状以及变形前的轮廓线，效果如图 6-2 所示。

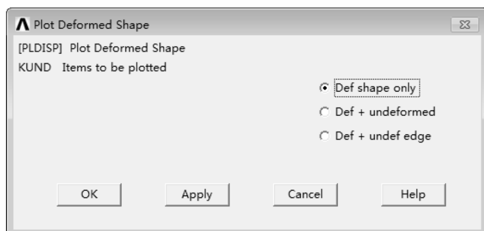


图 6-1　Plot Deformed Shape 对话框

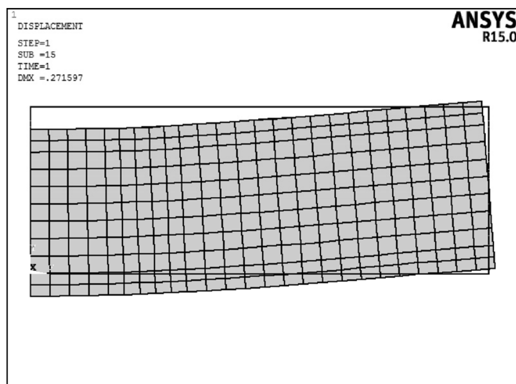


图 6-2　Def+undef edge

（2）变形动画

以动画方式模拟结构在静力作用下的变形过程：Utility Menu>PlotCtrls>Animate>Deformed Shape。

（3）绘制云图

在 ANSYS 一般后处理中，可以显示位移及应力应变等沿模型分布的云图。分为按节点和按单元两种显示模式。

路径如下。

- 按节点：选择 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 命令。
- 按单元：选择 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Element Solu 命令。

以按节点求解为例，打开对话框如图 6-3 所示。

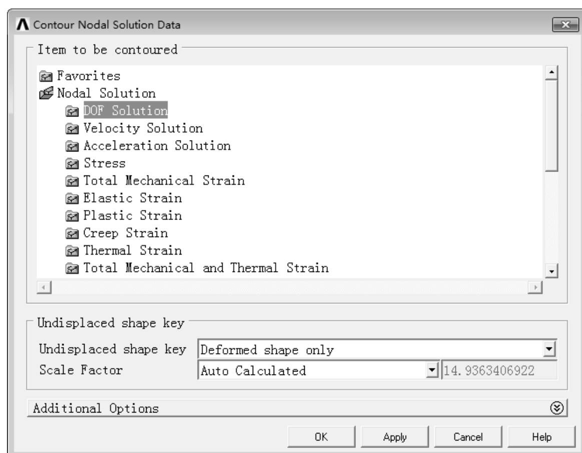


图 6-3　Contour Nodal Solution Data 对话框

选择 DOF Solution，可绘制各个方向的位移云图以及 3 个方向位移的总和云图等。

选择 Velocity Solution，可进行速度的求解结果云图绘制。以下依次还有加速度、应力、弹性应变、塑性应变等一系列的结果可以绘制。以 UZ 及 SZ 为例，UZ 绘图效果如图 6-4 所示，SZ 绘图效果如图 6-5 所示。

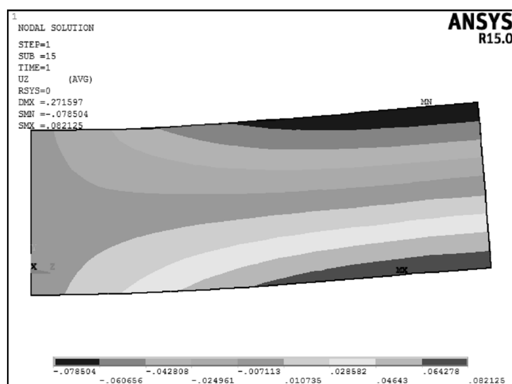


图 6-4　UZ 云图（Nodal Solution）

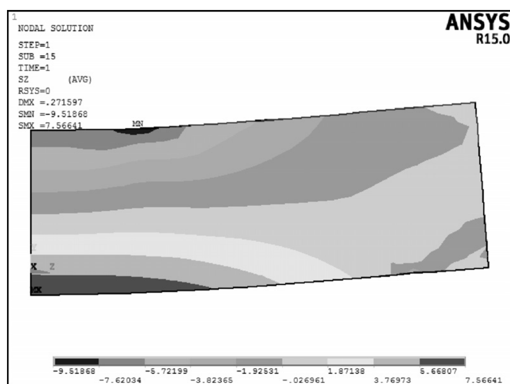


图 6-5　SZ 云图（Nodal Solution）

SZ 按单元绘制效果如图 6-6 所示。

注意：在按单元求解的绘制中，有类似的操作方法，但是按单元没有 DOF 项。

（4）等值线图

用户也可以通过 Utility Menu>PlotCtrls>Device Options 得到如图 6-7 所示对话框。在对话框中勾选/DEVI 为 ON，即打开矢量图的绘制，从而得到等值线图。

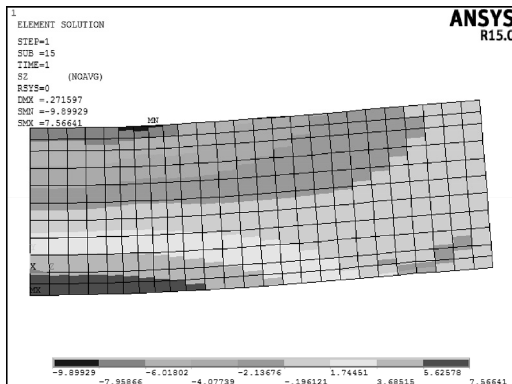


图 6-6　SZ 云图（ELEM Solution）

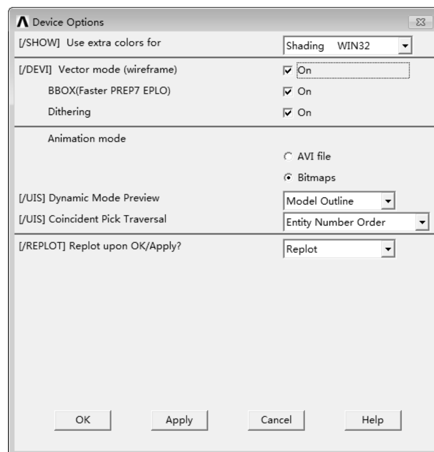


图 6-7　Device Options 对话框

此时再回到 Nodal Solu 对话框中，得到的各变形及云图即为等值线分布图。变形如图 6-8 所示，UY 等值线如图 6-9 所示。

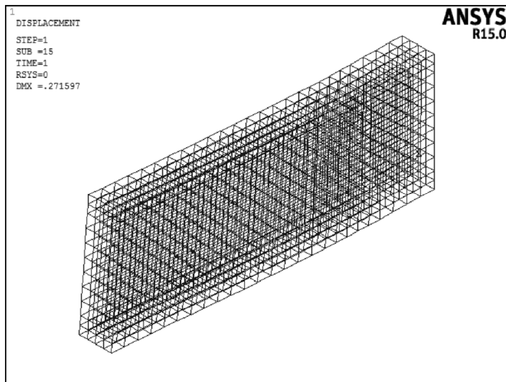


图 6-8　变形图

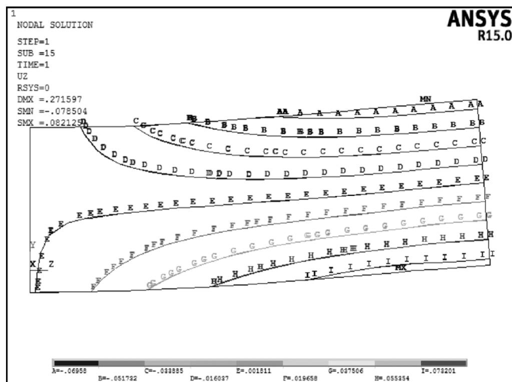


图 6-9　UY 等值线

技巧：在一些孔洞模型中，有时很难直接查看到内部情况，这种情况下通过查看等值线来得到内部分布图是很方便的。

按节点求解的应力等值线如图 6-10 所示，按单元求解的应力等值线如图 6-11 所示。

云图可以清楚直观地在模型上显示指定的结果项。

（5）路径方式显示计算结果

用户可以使用 GUI 界面中的如下命令来通过设定路径显示计算结果。

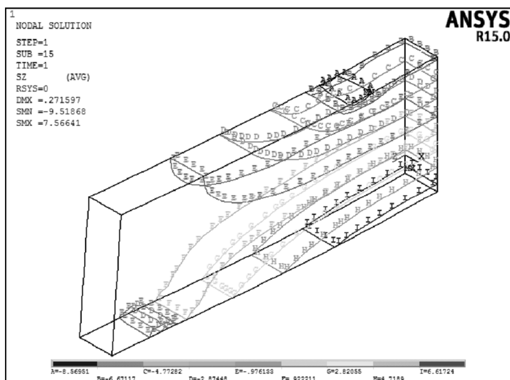


图 6-10　SZ（Nodal solution）

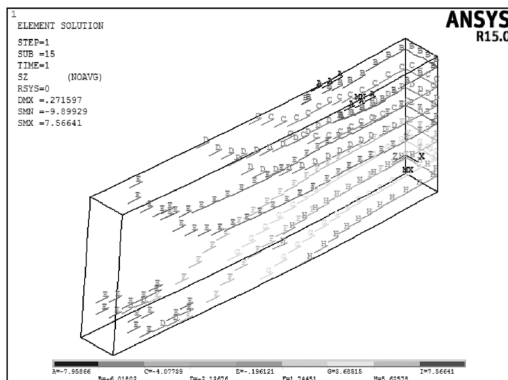


图 6-11　SZ（ELEM solution）

- Main Menu>General Postproc>Path Operations>Plot Path Item>On Graph。
- Main Menu>General Postproc>Plot Results>Plot Path Item>On Graph。
- Utility Menu>Plot>Results>Path Plot。

在弹出的如图 6-12 所示的 Plot of Path Items on Graph 对话框中选择要显示的路径单元，然后单击 OK 按钮即可。

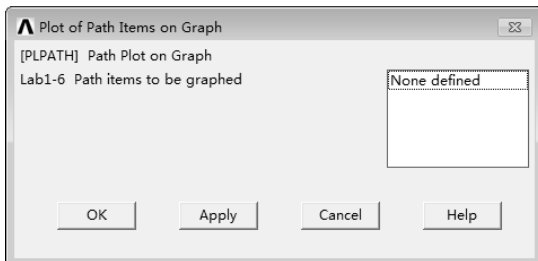


图 6-12　Plot of Path Items on Graph 对话框

用户只能显示已经定义的路径，定义路径可以使用 PATH 命令。

在通用后处理模块中：

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Path Items 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Archive Path>Retrieve>Path from array 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Archive Path>Retrieve>Paths from file 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Location 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Nodes 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>On Working Plane 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>Path Status>Defined Paths 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Recall Path 命令。

在前处理模块中：

- 选择 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Define Path>By Location 命令。
- 选择 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Define Path>By Nodes 命令。
- 选择 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Define Path>On Working Plane 命令。
- 选择 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Define Path>Path Status>Defined Paths 命令。
- 选择 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Recall Path 命令。
- 选择 Main Menu>Preprocessor>Path Operations>Retrieve>Paths from file 命令。
- 选择 Utility Menu>List>Status>General Postproc>Path Operations 命令。

弹出选择节点提示后，在工作区中选择节点并单击 OK 按钮，在弹出的定义路径的 By Nodes 对话框中输入参数，单击 OK 按钮，即可在弹出的路径列表中看到定义好的路径。

（6）显示边界条件及支反力

用户通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Symbols，选择是否显示边界及支反力等操作。

通过上述路径，得到对话框，如图 6-13 所示。

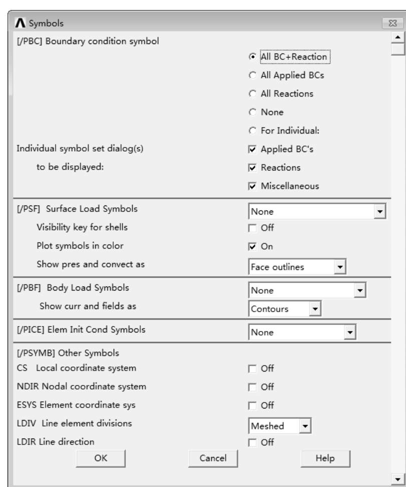


图 6-13 Symbols 对话框

勾选不同选项，可得到边界约束和支反力，显示约束如图 6-14 所示，显示支反力如图 6-15 所示。

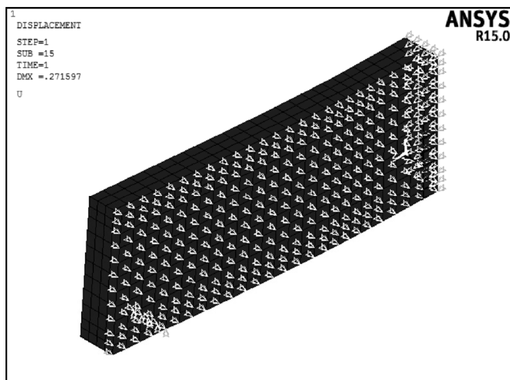


图 6-14 显示约束

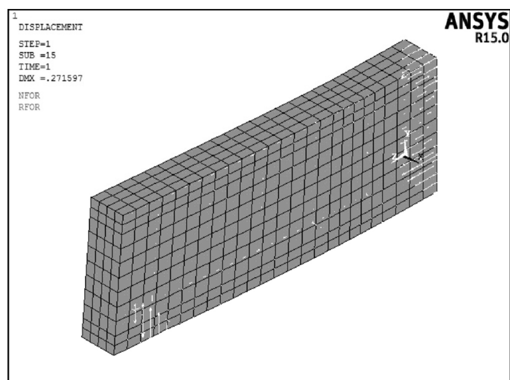


图 6-15 显示支反力

或者同时显示所有边界及支反力，如图 6-16 所示。

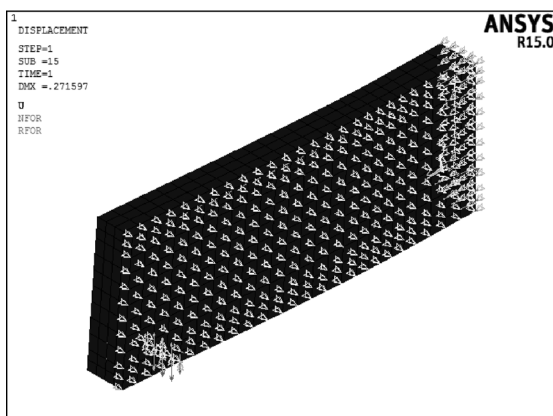


图 6-16　同时显示约束和支反力

6.1.3 结果查看器

在 GUI 界面中，选择 Main Menu> General Postproc>Results Viewer 命令，进入结果查看器，如图 6-17 所示。

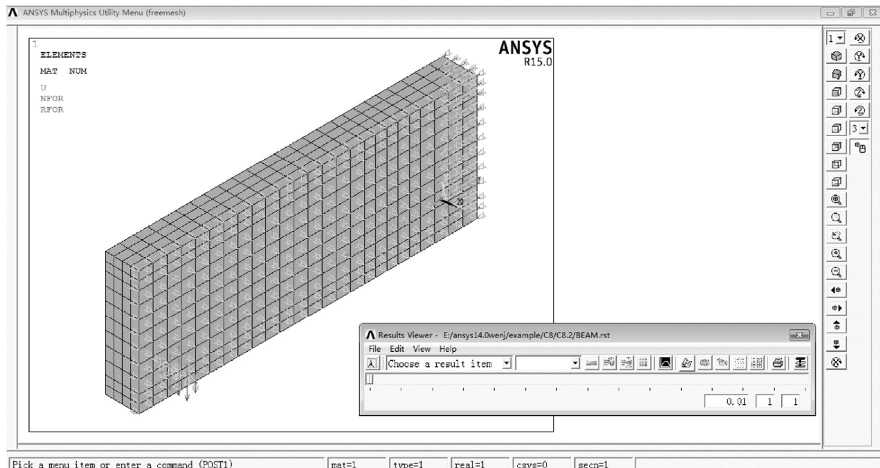


图 6-17　Results Viewer

如图 6-18 所示为结果查看器的控制窗口。



图 6-18　结果查看器控制窗口

在图 6-18 所示的这个控制器中，可以实现通用后处理器的大部分功能。

在图 6-19 所示的可显示对象列表中，可以选择需要显示在工作区中的项目，如图 6-20 所示。

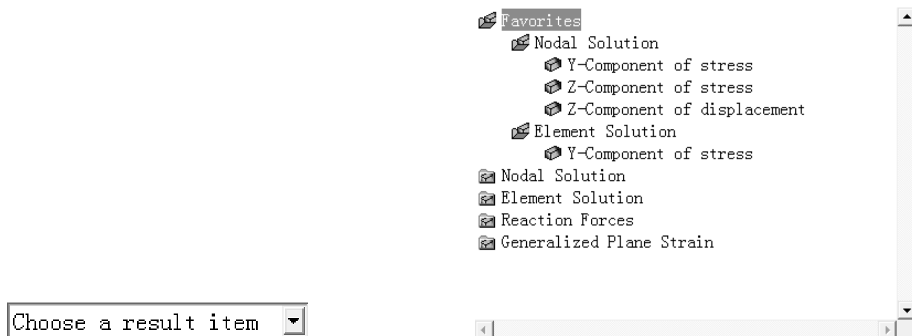


图 6-19　选择显示对象的列表框　　　　图 6-20　可显示对象列表

在这个列表框，可以选择包括节点解、单元解、支承反力等在内的各种结果。

在图 6-21 所示的工具栏按钮中，从左至右分别是显示结果、查询结果、显示结果动画、结果列表、进入时间历程处理器、报告生成器、捕捉图像、捕捉动画、捕捉结果列表、打印选项、显示隐藏窗口。



图 6-21　工具栏按钮

在图 6-22 所示的时间轴上，可以控制显示的荷载步或时间点。

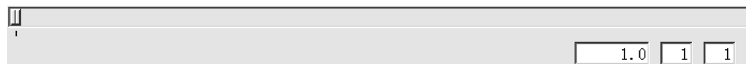


图 6-22　时间轴

灵活运用结果查看器可以方便直观地观察分析结果，也可以方便地比较不同场分析的结果。

6.1.4 分析结果的列表显示

与图像显示相对应，ANSYS 中可以进行列表显示结果，结果项基本与图像显示相对应，但是可以将结果数字化，这样方便数据的整理与提取。

（1）列表显示计算结果

用户可以在 GUI 界面中选择下列命令之一。

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Nodal Solution 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Sorted Listing>Sort Nodes 命令。
- 选择 Utility Menu>List>Results>Nodal Solution 命令。

执行以上命令打开的对话框如图 6-23 所示。其选项功能与绘图时的 Nodal solution 一样。

得到的 LIST 如图 6-24 所示。

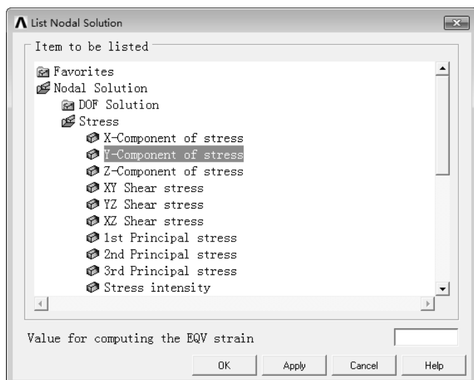


图 6-23　List Nodal Solution 对话框

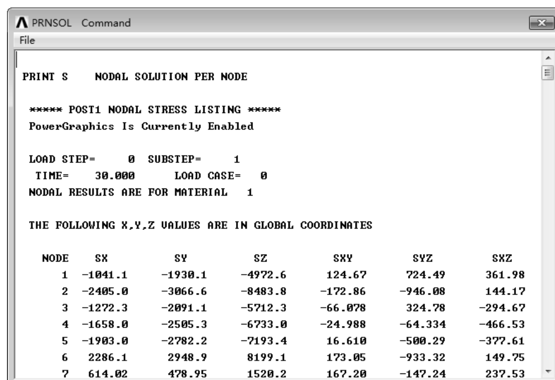


图 6-24　Z 方向节点应力（SZ）列表

用户同样可以得到单元解的列表。

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Element Solution 命令。
- 选择 Utility Menu>List>Results>Element Solution 命令。

操作方式类似。

（2）单元表的排序

用户可以使用 GUI 界面中的如下命令对单元表进行排序。

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Sorted Listing>Sort Nodes 命令。
- 选择 Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data 命令。

在弹出的如图 6-25 所示的 Sort Nodes 对话框中，选择要控制的排序项，单击 OK 按钮即可。

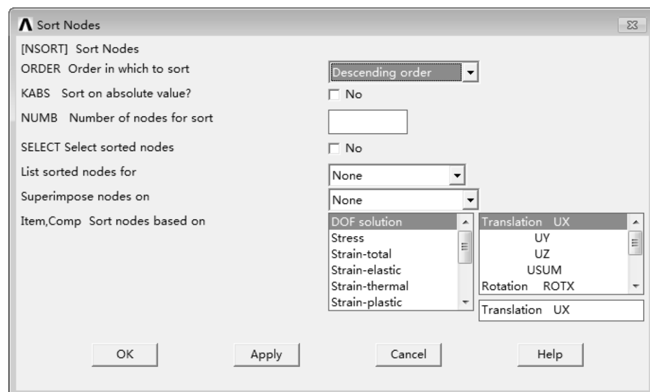


图 6-25　Sort Nodes 对话框

当需要恢复 ANSYS 默认的排序方式时，可以使用 NUSORT 命令。也可以在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Sorted Listing>Unsort Nodes 命令，弹出 Unsort Nodes 确认提示对话框提示，单击 OK 按钮确认即可。

对于单元解，有相同的操作方式。

路径：选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Sorted Listing>Sort Elems 命令。

单元解的默认排列方式是以单元号升序排列。

恢复单元解默认排列方式可以在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Sorted Listing>UnsortElems 命令。

（3）列出支反力

用户可以在 GUI 界面中通过下列路径得到支反力结果。

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Reaction Solu 命令。
- 选择 Utility Menu>List>Results>Reaction Solution 命令。

在弹出的如图 6-26 所示的 List Reaction Solution 对话框中，选择要列表的对象，单击 OK 按钮即可。如图 6-27 为列出 FY 的值。

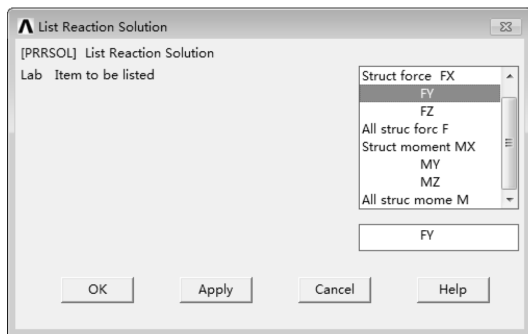


图 6-26　List Reaction Solution 对话框

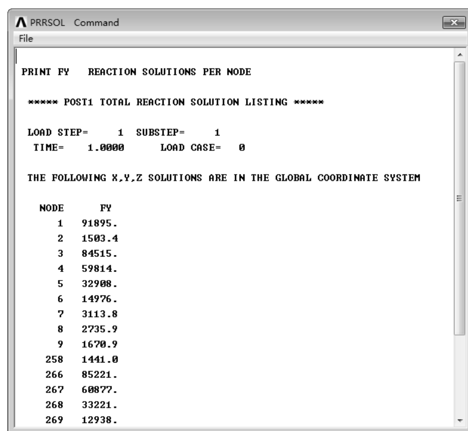


图 6-27　Y 方向节点反力列表

（4）列出节点荷载总和

可以得到指定节点的荷载总和，路径如下。

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Nodal Loads 命令。
- 选择 Utility Menu>List>Results>Nodal Loads 命令。

在弹出的如图 6-28 所示的 List Nodal Loads 对话框中，选择要列表的对象，单击 OK 按钮即可。如图 6-29 所示，列出 FY 的值。

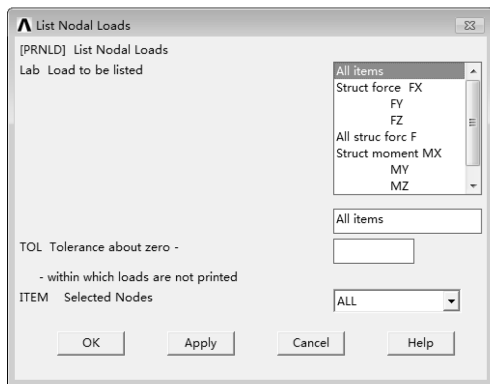


图 6-28　List Nodal Loads 对话框

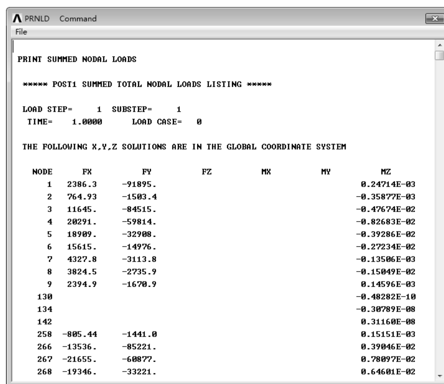


图 6-29　Y 方向节点荷载列表

（5）列出求解结果的矢量与方向

用户可以得到指定结果类型的矢量大小与方向余弦，路径如下。

- 选择 Main Menu>General Postproc>List Results>Vector Data 命令。
- 选择 Utility Menu>List>Results>Vector Data 命令。

通过以上任一路径，弹出如图 6–30 所示的 List Vector Data 对话框，在其中选择所要列表的矢量，单击 OK 按钮确认即可。如图 6–31 所示的即为列表显示位移矢量。

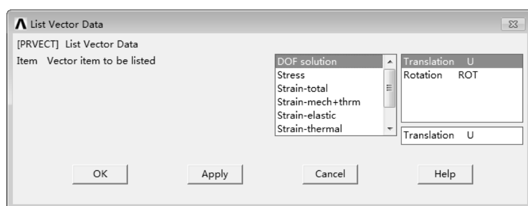
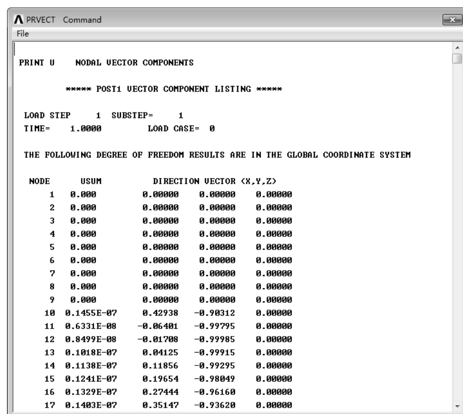


图 6–30 List Vector Data 对话框



PRINT U NODAL VECTOR COMPONENTS

***** POST1 VECTOR COMPONENT LISTING *****

LOAD STEP 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0

THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM

NODE	USUM	DIRECTION VECTOR (X,Y,Z)		
1	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
2	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
3	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
4	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
5	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
6	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
7	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
8	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
9	0.000	0.00000	0.00000	0.00000
10	0.1455E-07	0.42938	-0.90312	0.00000
11	0.6331E-08	-0.06401	-0.99795	0.00000
12	0.8499E-08	-0.01708	-0.99985	0.00000
13	0.1018E-07	0.04125	-0.99915	0.00000
14	0.1138E-07	0.11856	-0.99295	0.00000
15	0.1241E-07	0.19654	-0.98049	0.00000
16	0.1329E-07	0.27444	-0.96160	0.00000
17	0.1403E-07	0.35147	-0.93620	0.00000

图 6–31 位移矢量数据列表

6.1.5 结果的运算处理

ANSYS 的通用后处理器可以对结果进行一定的处理，方便用户的进一步分析使用。这些特殊结果包括求和、强度因子、积分等。可以使用的命令如表 6–2 所示。

表 6–2 特殊结果处理命令

命 令	功 能
FSUM	计算每个单元的节点力的和
NFORCE	计算每个所选节点上的节点力和节点弯矩，并对所选节点相关单元进行求和
SPOINT	定义力矩求和的位置点
KCALC	计算强度因子
INTSRF	对外表面节点结果积分

用户可以在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Total Force Sum 命令，在弹出的如图 6–32 所示的 Caculate Total Force Sum for All Selected Nodes 对话框中，完成设置并单击 OK 按钮，得到节点力的合力。

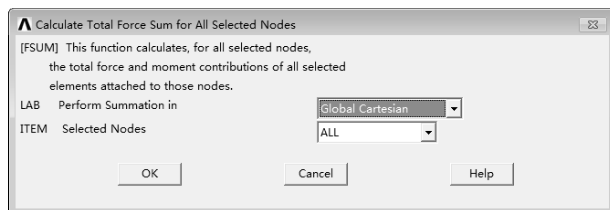


图 6–32 Caculate Total Force Sum for All Selected Nodes 对话框

用户也可以在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Sum @ Each Node 命令，弹出如图 6-33 所示的 Calculate Force/Moment Sum at Each Node 对话框，完成设置并单击 OK 按钮，得到各节点的力与力矩之和。

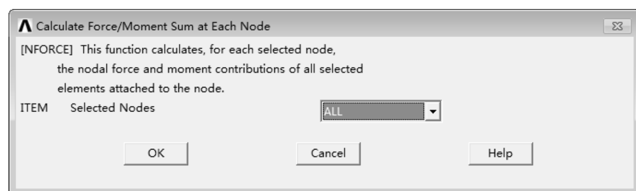


图 6-33 Calculate Force/Moment Sum at Each Node 对话框

选择如下路径之一可以定义力矩的求解位置。

- 选择 Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Summation Pt>At Node 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Summation Pt>At XYZ Loc 命令。

两者分别为定义在节点位置与定义坐标值，在弹出的拾取对话框的提示下拾取所需要的点即可。

用户可以使用 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Stress Int Factr 命令，在弹出的如图 6-34 所示的 Stress Intensity Factor 对话框中，根据所示设置完成，单击 OK 按钮，可得到断裂力学分析中计算强度因子。

用户也可以计算分布荷载的总和，如面荷载、体积荷载等。在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Nodal Calcs>Surface Integral 命令，弹出如图 6-35 所示的 Integrate Scalar Value over Selected Nodes 对话框中，选择需要求积分的项，单击 OK 按钮。

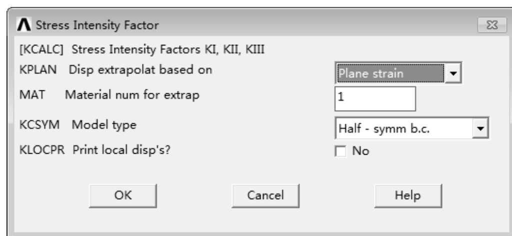


图 6-34 Stress Intensity Factor 对话框

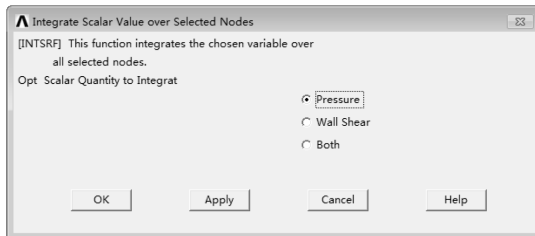


图 6-35 Integrate Scalar Value over Selected Nodes 对话框

6.1.6 旋转结果到不同的坐标系

结果数据包括位移（UX、UY 、ROTX 等），梯度（TGX、TGY 等），应力（SX、SY、SZ 等），应变（EPPLX、EPPLXY 等）等，这些数据文件以节点坐标系或单元坐标系存入数据库和结果文件中。然而结果数据通常要变换激活到激活的结果坐标系中（默认为全局笛卡儿坐标系），用于在工作区显示或列表。

使用 RSYS 命令可以转换激活的坐标系，如图 6-36 所示。

用户可以通过如下 GUI 界面路径完成坐标转换。

- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> Rotate Node CS> To Active CS 命令。

- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Move/Modify> Rotate Node CS> To Active CS 命令。

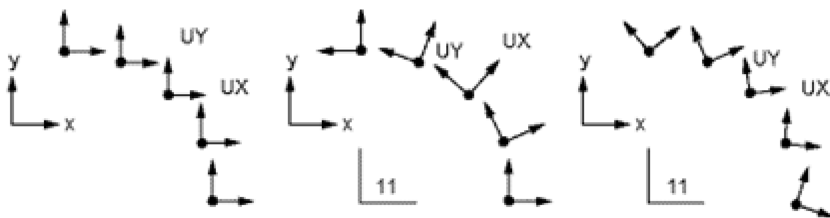


图 6-36 使用 RSYS 命令进行结果变换

- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> In Active CS 命令。
- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> Rotate Node CS> By Angles 命令。
- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Move/Modify> Rotate Node CS> By Angles 命令。
- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> Rotate Node CS> By Vectors 命令。
- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Move/Modify> Rotate Node CS> By Vectors 命令。
- 选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Move/Modify>RotateNode> To Surf Norm> On Areas 命令。

6.1.7 荷载工况

荷载工况操作是利用当前数据库（在内存中）的数据和另外的荷载工况数据（在结果文件或荷载工况文件中）的运算和组合，即利用荷载工况及其运算不断改变当前数据库中的结果数据，所有的图形显示和列表都是基于当前数据库中的结果，荷载工况不过是个手段。

（1）荷载工况

荷载工况是一组赋以任意编号的结果数据，可以将某几个荷载步组合为荷载工况 1，或将某个时间点的荷载工况结果定义为荷载工况 2，最多可以定义 99 个荷载工况，在数据库中一次只能存储一个荷载工况。定义和读取荷载工况的 GUI 路径：

- 选择 Main Menu>General Postproc>Load Case>Create Load Case 命令。
- 选择 Main Menu>General Postproc>Load Case>Read Load Case 命令。

（2）荷载工况运算

荷载工况之间的运算，运算结果将改写数据库中的结果数据部分，可以列出及显示荷载工况组合。

用户可以在 GUI 界面中使用如下路径进行操作。

选择 Main Menu>General Postproc>Load Case>operation 命令。

其中，operation 在主菜单中对应各具体运算：Add、Subtract、Square 等。

例如，下面一段命令流给出了简单的工况操作：

lcdef，1，3

lcdef，2，5

lcase，1

lcoper，min，2

上述命令的意思是，分别将荷载工况 1 定义为荷载步 3、荷载工况 2 定义为荷载步 5，然后读入荷载工况 1，将之与荷载工况 2 比较，然后取最小值读入内存。

相应的 GUI 操作如下：

在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Load Case>Create Load Case 命令，弹出图 6-37 所示的 Create Load Case 对话框。

在 Create Load Case 对话框中选择从 Results file（结果文件）创建荷载步，单击 OK 按钮，弹出如图 6-38 所示的 Create Load Case from Result File 对话框。

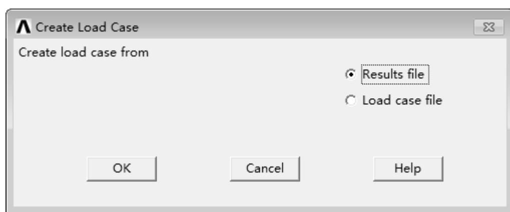


图 6-37　Create Load Case 对话框

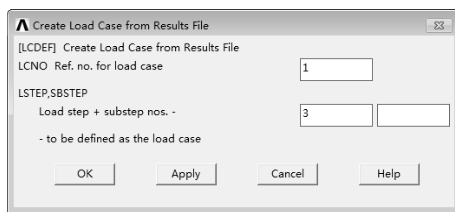


图 6-38　Create Load Case from Result File 对话框

在 Create Load Case from Result File 对话框中的 LCNO（荷载工况编号）输入框中输入 1，在 LSTEP（荷载步）输入框中输入 3，单击 Apply 按钮。

当再次弹出图 6-37 所示的 Create Load Case 对话框时，重复上述操作，将荷载工况编号定义为 2，荷载步选择 5，单击 OK 按钮完成。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Load Case>Read Load Case 命令，弹出图 6-39 所示的 Read Load Case 对话框。

在 LCNO（荷载工况编号）输入框中将要读入的荷载工况编号 1，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Load Case>Min&Max 命令，弹出如图 6-40 所示的 Minimum and Maximum of Load Cases 对话框，选择 Oper 为 Algebraic min，在 LCASE1 输入框中输入 1，在 LCASE2 输入框中输入 2，单击 OK 按钮完成。

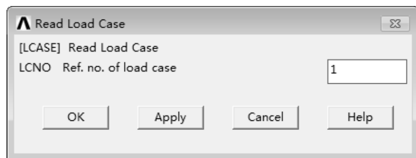


图 6-39　Read Load Case 对话框

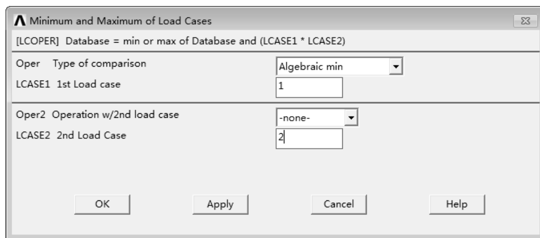


图 6-40　Minimum and Maximum of Load Cases 对话框

6.2　时间历程后处理

ANSYS 的另一个后处理器是时间历程后处理，也称之为 POST26。

6.2.1 时间历程后处理窗口介绍

ANSYS 的时间历程处理器（POST26）的 GUI 界面功能强大，在分析结束后，依次选

择路径 Main Menu>TimeHistPostpro，首先会弹出时间历程后处理的综合窗口，如图 6-41 所示。在此窗口中可以完成所有主要的时间历程后处理操作。

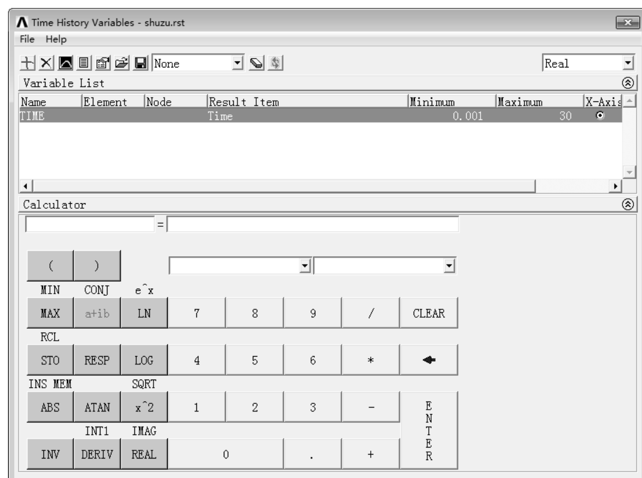


图 6-41 时间历程后处理综合窗口

时间历程变量浏览器是进行时间历程后处理的主要窗口，在这个窗口里用户可以管理要处理的数据、绘制曲线、进行一定的数学处理等。

如图 6-42 所示是时间历程变量浏览器的工具按钮。



图 6-42 工具按钮

工具按钮按从左到右排列，其功能依次如表 6-3 所示。

表 6-3 工具按钮功能列表

按 钮	功 能
添加数据	打开“添加时程变量”对话框
删除数据	从变量列表中清除选定的变量
绘出曲线	根据预定义的属性绘出最多 10 个变量的曲线
列表显示数据	列出最多 6 个变量的数据，包括极值
属性	选定的变量的属性
导入数据	将数据导入变量空间
导出数据	将数据导出到一个文件
数据叠加	将选中的数据叠加
清除时间历程数据	清除所有的变量，并返回设置为它们的默认值（复位）
刷新数据	更新变量列表
查看结果	在下拉列表中选择复杂的变量（即实、虚、振幅或相位）输出形式

如图 6-43 所示为时间历程变量浏览器的变量列表，这里显示用户添加的要进行处理的数据。

Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
TIME			Time	1	10	⊙

图 6-43　变量列表

如图 6-44 所示为时间历程变量浏览器的计算区域。计算区域具有一定的数学运算能力，可以进行一定的数学处理。

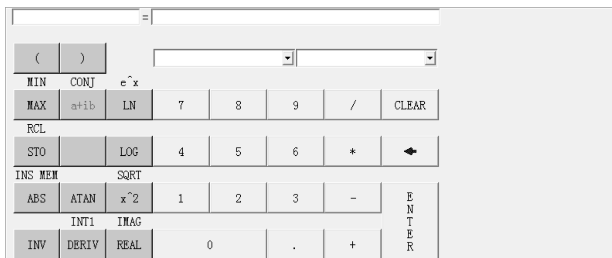


图 6-44　计算区域

计算区域功能列表如表 6-4 所示。

表 6-4　计算区域功能列表

按　　钮	功　　能
括号	使用括号
MAX / MIN	查找最大值/最小值
COMPLEX/ CONJUGATE	生成变量的共轭复数
LN / e^X	自然对数/指数
STO / RCL	存储/清空内存
CVAR	协方差
RPSD	计算响应的功率谱密度（RPSD），仅用于随机振动（PSD）分析
RESP	从时间历程数据计算响应的功率谱（RESP），瞬态分析
LOG	求对数
ABS / INS MEM	绝对值
ATAN	反正切
X^2 / SQRT	平方/开方
INV	启用备用计算功能
DERIV / INT	求导/求积分
REAL / IMAG	提取复变量的实部/虚部
数字键	输入数字
/	除法
*	乘法
-	减法
+	加法
CLEAR	清除
BACKSPACE	删除最后一位
ENTER	确定

6.2.2 定义变量

时间历程后处理器 POST26 用于处理模型中点的结果与时间或频率的关系，主要应用于动力学分析或非线性分析中，如动位移-时间关系、荷载-位移曲线等。POST26 的操作均基于变量，即定义变量后的所有操作均针对变量。

定义变量有多种方式，用时间历程后处理窗口进行定义。

在 GUI 界面中选择 TimeHistPostPro 命令或输入/POST26 命令，进入时间历程后处理器。

单击 Variable Viewer，即可调出时间历程变量浏览器。单击左上角的绿色 X，打开如图 6-45 所示的 Add Time-History Variable 对话框。定义好的变量将显示在如图 6-46 所示对话框中。

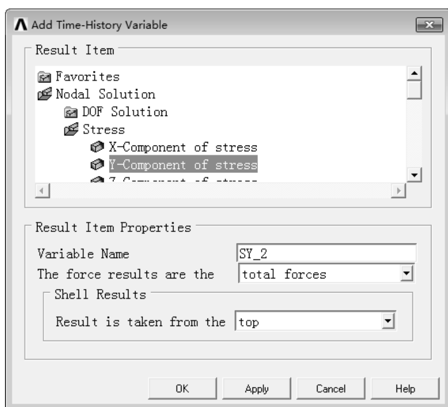


图 6-45 Add Time-History Variable 对话框

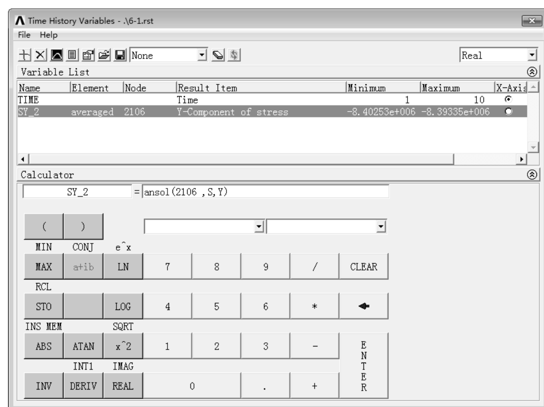


图 6-46 定义变量

在 Resout Item 列表框中选择要添加的数据，在下方的属性选项中完成设置，单击 OK 按钮，即可完成变量定义。

用命令定义变量时实际上是建立了一个变量号与结果数据项的关系，而并没有从结果文件读入变量数据到数据库中（称为存储变量），即命令方式的变量定义与变量存储是两步完成的。定义变量的命令如表 6-5 所示。

表 6-5 定义变量命令

命 令	功 能	备 注
NSOL	以节点数据定义变量	节点结果，如自由度等
ESOL	以单元的节点数据定义变量	导出结果数据
RFORCE	以节点反力定义变量	如 F 或 M 的分量
EDREAD	以显式动力分析结果定义变量	适用于 LSDYNA 模块
GAPF	以间隙力定义变量	类同常用图素删除命令
ANSOL	以平均的节点数据定义变量	导出的结果数据，如应力等
SOLU	以结果总体数据定义变量	PRITER 命令可直接输出
NUMVAR	定义 POST26 中允许的变量数	不能超过 200 个

（续）

命　令	功　能	备　注
TVAR	以平衡迭代次数替代 TIME 变量	
VARNAM	为变量命名或重命名	给变量一个识别符以显示
TIMERANGE	定义拟存储数据的时间范围	可减少内存占用
LAYERP26	定义取用层单元何处的数据	指定层号
FORCE	定义取用何类型的力数据	指定静态、阻尼、惯性及总力
SHELL	定义取用 SHELL 何处的数据	指定壳顶、中及底面
STORE	指定变量存储	储存到数据库中
NSTORE	指定 TIME 点存储	
RESET	将 POST1 和 POST26 恢复默认	全部恢复到初始的默认设置

6.2.3 变量运算

利用变量运算可得到一些期望的结果。变量运算后均生成一新的变量，与原定义变量处理方法相同。

运算命令路径：GUI>Main Menu>TimeHistPostpro>Math Operations。

相应的选项可进行加减、乘、除、求绝对值、开根号、求幂、求指数对数、求导、积分和求最大值最小值等运算。

6.2.4 变量与数组

变量与数组可以转换，可将变量赋给数组以便计算或输出等，也可以将数组赋给变量以便运算和显示等。同时可从文件读入数据赋给变量，也可将变量赋给数组后写入文件。

（1）将变量赋给数组

路径为选择 Main Menu>TimeHistPostpro>Table Operations>Variable to Par 命令。

该路径将变量数据赋给数组，但该数组应事先定义。

当采用循环赋值时，可使用*VLEN 命令控制循环次数，且对多维数组只有第 1 个下标可增加。

（2）数组赋给变量

路径为选择 Main Menu>TimeHistPostpro>Table Operations>Parameter to Var 命令。

该路径通过数组赋给变量从而生成新的变量。执行该命令前至少定义一个变量。

（3）从文件读入数据赋给变量

该方法无法从 GUI 进行操作，可以应用命令流进行调用，具体如下。

命令：DATA，IR，LSTRT，LSTOP，LINC，Name，KCPLX。

该命令从文件读入数据生成新的变量，在被读文件的第 1 行必须为 DATA 命令及其参数，第 2 行为数据格式说明，从第 3 行开始是数据。数据格式类似 FORTRAN 语言的读入数据格式，但仅为 FORMAT 后面括号及括号中的内容。DATA 命令读入数据时不能使用整型、字符型和自由等数据格式。所建立的数据文件采用/INPUT 命令读入并执行。

如果要使用自由格式读入数据，可先用*TREAD 命令读入表数组，然后用 VPUT 命令将表数组数据赋给变量。

6.2.5 变量的显示

定义好的变量可以在工作区中绘出曲线。

如图 6-47 所示，在变量列表中选择要绘制曲线的变量，单击工具组中的相应按钮（见图 6-42），工作区中即显示所选变量与时间关系曲线，如图 6-48 所示。

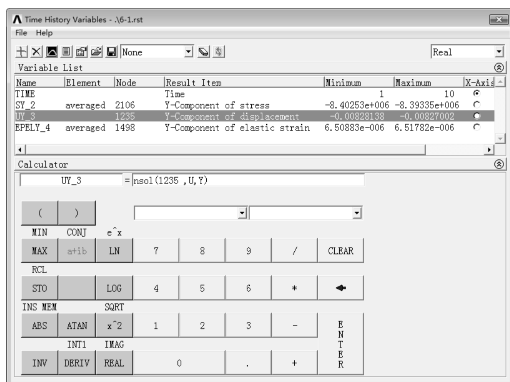


图 6-47 选择需要绘制曲线的变量

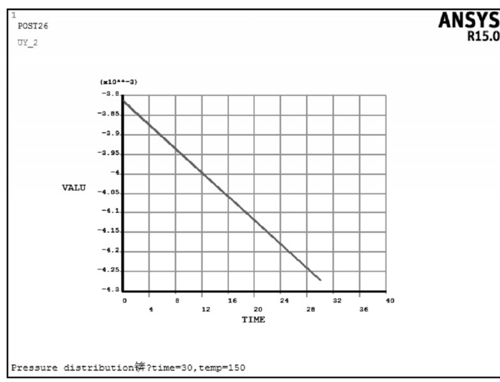


图 6-48 绘制变量-时间曲线

用户也可以通过命令设定坐标轴格式以及要绘制的变量，相关命令如表 6-6 所示。

表 6-6 定义坐标及变量命令列表

命　令	功　能	命　令	功　能
XVAR	定义图形显示的 X 轴	NPRINT	定义列表的时间点
PLTIME	定义图形显示的时间范围	SPREAD	为后续显示打开虚线误差曲线
PLCPLX	定义图形显示复数的组成	PLVAR	图形显示变量
PRCPLX	定义列表显示复数的格式	PRVAR	列表显示变量
PRTIME	定义列表显示的时间范围	EXTREM	列表显示变量的极值
LINES	定义列表显示每页的行数		

6.3 本章小结

本章系统地讲解了 ANSYS 软件的后处理功能。ANSYS 程序提供了两种后处理器：通用后处理器和时间历程后处理器。

通用后处理器（/POST1）用于分析处理整个模型在某个荷载步的某个子步、某个结果序列、某特定时间或频率下的结果，例如结构静力求解中荷载步 2 的最后一个子步的压力、或者瞬态动力学求解中时间等于 6s 时的位移、速度与加速度等。通用后处理可以直接显示出计算结果的云图和计算数值的列表，也可以进行结果的运算处理，还可以进行荷载工况的加减运算。

时间历程后处理器（/POST26）用于查看模型中某个点的自由度、应力等结果的关于时间、频率等的函数关系。用户可以在 ANSYS 时间历程后处理器中进行简单的时间曲线或者复杂频谱的绘制。时间历程后处理器在 GUI 界面中功能强大，初学用户无须通晓 APDL 语言（将在后面的章节介绍），即可以方便地进行复杂的处理。/POST26 可以对结果数据进行加减、积分、微分等处理。

第 7 章　参数化设计语言

ANSYS 参数化设计语言（ANSYS Parametric Design Language，APDL）是用户进行参数设计、处理大型复杂项目必不可少的得力助手。与图形界面（GUI）的操作相比，命令方式操作具有更大的优势。APDL 语言具有便于修改、可使用编程控制命令、易于保存及文件处理等优点。

7.1　参数化设计语言基础知识

APDL 语言与 GUI 操作方式相比，具有巨大的优势，对于熟悉编程的用户，可以方便掌握，轻易实现参数化设计与分析过程，易于建立可反复使用多次修改的模型与分析项目，对于大型分析对象、需要反复计算处理的对象等非常适用。

7.1.1　APDL 语言的输入

在 ANSYS 15.0 中，快捷工具栏中的长条形输入框即为 GUI 界面命令输入窗口，如图 7-1 所示。



图 7-1　快捷工具栏

用户可以在图 7-1 所示的输入框中直接输入命令，按〈ENTER〉键执行，也可以从外部复制粘贴到命令输入框中按〈Enter〉键执行。

用户也可以先在任何能编辑文本的程序中编写代码，保存为文本文件。然后在 GUI 界面中选择 Utility Menu>File>Read Input from 命令，选择已编写好的代码文件，读入执行即可。

7.1.2　APDL 语言的参数

参数是 APDL 的变量。在 ANSYS 中，定义参数不必明确声明参数类型。所有数值变量（整形或实形）都以双精度数储存。被使用但未声明的参数都被赋一个接近 0 的值，或“极小值”，大约为 2^{-100}。例如，若参数 A 被定义为 A=B，但 B 没被定义，则赋给 A 一个极小值。

ANSYS 包含两种类型的参数：标量和数组。括在单引号中的字符串（最多 8 个字符）可以赋给参数。APDL 提供的数组参数的类型有：数值、字符和表（一种特殊的数值数组，能自动产生插值）。

可以用一个参数（代替数值或字符串）作为任何一个 ANSYS 命令的变量，该参数被求值并被赋给命令变量。例如，把值 3 赋给参数 AA，然后执行命令：

N，12，AA，4

ANSYS 程序将把该命令解释为：N，12，3，4！定义节点 12 为 X=3，Y=4。

（1）参数的命名规则



参数名称必须以字母开头，且只能包含字母、数值和下画线。

下面列出的均为无效参数名：

- NEW_VALUE（超过 8 个字符）。
- 2CF3（以数值开头）。
- M&E（含非法字符"&"）。

在命名参数时，注意以下几点：

1）要避免参数名与经常使用的 ANSYS 标识字相同，如：自由度（DOF）标识字（TEMP，UX，PRES 等）；常用标识字（ALL，PICK，STAT 等）；用户定义标识字（如用 ETABLE 命令定义的标识字）；数组类型标识字（如 CHAR，ARRAY，TABLE 等）。

2）名称为从 ARG1～ARG9 和 AR10～AR99 的参数被保留为局部参数。

提示：通常，局部参数用于宏中。

3）参数名不能与用*ABBR 命令定义的缩写相同。

4）参数名不能以下画线“_”开头。这类参数名只能用于 GUI 和应用于 ANSYS 的宏中。

（2）参数的定义方法

定义参数的方法主要有：直接赋值给参数或从数据库中获取信息。

可以提取 ANSYS 提供的值，再把这些值赋给参数，或者用*GET 命令或各种内嵌获取函数从 ANSYS 中提取值。

1）直接赋值给参数。在运行过程中，可以用*SET 命令定义参数。如下面的例子：

```
*SET，ABC，-24
*SET，TM，2.07E11
*SET，XORY，ABC
```

也可以用“=”作为一种速记符来调用*SET 命令（这更方便），其格式为 Name=Value，这里 Name 是指参数名，Value 是指赋给该参数的数值或字符。

注意：对于字符参数，赋给的值必须被括在单引号中，并不能超过 8 个字符。

等号“=”的用法如下：

```
ABC=-24
TM=2.07E11
XORY=ABC
```

这与上面的*SET 是等效的。

在 GUI 中，可以直接在 ANSYS 输入窗口或标量参数对话框的“Selection”域（通过 Utility Menu>Parameters>Scalar Parameters 菜单项访问）中输入“=”。

2）从数据库中获取信息。ANSYS 提供了两种方法来从 ANSYS 中提取数据：*GET 命令是指从某个特定的项目中提取数据并赋给某个特定的参数；内嵌获取函数，可在运行时使

用。每个获取函数从某个特定的项目中提取特定的数据。

*GET 命令（Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data）从某个特定的项目（一个点、一个单元、一个面等）中提取 ANSYS 提供的数据并赋给某个用户命名的参数。各种关键词、标识字和数字结合在一起来确定被提取的项目。

*GET 命令的使用格式为：

*GET，Par，Entity，ENTNUM，Item1，IT1NUM，Item2，IT2NUM

其中，Par 是将被赋值的参数名；Entity 是被提取项目的关键词，有效的关键词是 NODE，ELEM，KP，LINE，AREA，VOLU 等，在 ANSYS Commands Reference（ANSYS 命令参考手册）中的*GET 部分对之有完整的说明；ENTNUM 是实体的编号（若为 0 指全部实体）；Item1 是指某个指定实体的项目名。例如，如果 Entity 是 ELEM，那么 Item1 要么是 NUM（选择集中的最大或最小的单元编号），要么是 COUNT（选择集中的单元数目）。在 ANSYS Commands Reference（ANSYS 命令参考手册）中的*GET 部分对每种实体的 Item1 值有完整的说明。

可以把*GET 命令看成是对一种树型结构从上至下的路径搜索，即从一般到特殊的确定。

可用下面的例子来说明*GET 命令的用法。如：

```
*GET，A，ELEM，5，CENT，X，
```

意为返回单元 5 的质心的 X 坐标值并赋给参数 A。

```
*GET，BCD，ELEM，97，ATTR，MAT        ! BCD＝ 单元 97 的材料号
```

获得单元 97 的材料属性（MAT 参考号）并赋给单元 BCD。

类似的还有（！之后为注释）：

```
*GET，X1，NODE，1，LOC，X   /POST1     ! X1=节点 1 的 X 坐标  [CSYS]*
*GET，SX25，NODE，25，S，X            !SX25=节点 25 的 X 方向应力  [RSYS]*
*GET，UZ44，NODE，44，U，Z            !UZ44=节点 44 的 UZ 方向的位移[RSYS]*
NSORT，S，EQV                         !对节点的 VON MISES 应力排序
*GET，SMAX，SORT，，MAX               !SMAX＝ 排序的最大值
ETABLE，VOL，VOLU                     !用 VOL 存储单元体积
SSUM                                  !对单元表的列求和
*GET，TOTVOL，SSUM，，VOL             !TOTVOL＝ 对 VOL 的列求和
```

提示：

1）*CSYS＝ 激活坐标系 (CSYS)。

2）RSYS＝ 激活的结果坐标系 (RSYS)。

一些数据可以通过函数获取。

例如：

K，10，KX(1)，KY(3)!10 号关键点 X 坐标取 1 号关键点的 X 坐标，Y 坐标取 3 号关键点的 Y 坐标。

K，11，KX(1)*2，KY(3) ! [CSYS]*。
F，NODE(2，2，0)，FX，100　!在节点(2，2，0)施加力 FX [CSYS]*。
*CSYS = 激活坐标系 (CSYS)。

获取函数的参数可以是参数也可以是其他的获取函数。例如，获取函数 NELEM（ENUM，NPOS）返回在单元 ENUM 上 NPOS 处的节点编号，则联合函数 NX（NELEM（ENUM，NPOS））返回该节点的 X 坐标值。如表 7-1 所示，列出了可用的获取函数。

表 7-1　可用的获取函数

获 取 函 数	提 取 值
NSEL(N)	节点 N 的状态(-1=未被选择，0=未定义，1=被选择)
ESEL(E)	单元 E 的状态(-1=未被选择，0=未定义，1=被选择)
KSEL(K)	关键点 K 的状态(-1=未被选择，0=未定义，1=被选择)
LSEL(L)	线 L 的状态(-1=未被选择，0=未定义，1=被选择)
ASEL(A)	面 A 的状态(-1=未被选择，0=未定义，1=被选择)
VSEL(V)	体 V 的状态(-1=未被选择，0=未定义，1=被选择)
NDNEXT(N)	选择节点编号大于 N 的下一个节点
ELNEXT(E)	选择单元编号大于 E 的下一个单元
KPNEXT(K)	选择关键点编号大于 K 的下一个关键点
LSNEXT(L)	选择线编号大于 L 的下一条线
ARNEXT(A)	选择面编号大于 A 的下一个面
VLNEXT(V)	选择体编号大于 V 的下一个体
CENTRX(E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 X 坐标值
CENTRY(E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 Y 坐标值
CENTRZ(E)	单元 E 的质心在总体笛卡儿坐标系中的 Z 坐标值
NX(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
NY(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
NZ(N)	节点 N 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
KX(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 X 坐标值
KY(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Y 坐标值
KZ(K)	关键点 K 在当前激活坐标系中的 Z 坐标值
LX(L，LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC(0.0～1.0)处的 X 坐标值
LY(L，LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC(0.0～1.0)处的 Y 坐标值
LZ(L，LFRAC)	线 L 的长度百分数为 LFRAC(0.0～1.0)处的 Z 坐标值
NODE(X，Y，Z)	距点 X，Y，Z 最近的被选择的节点的编号（在当前激活坐标系中；符合条件的关键点中编号最小者）
KP(X，Y，Z)	距点 X，Y，Z 最近的被选择的关键点的编号（在当前激活坐标系中；符合条件的关键点中编号最小者）

（续）

获 取 函 数	提 取 值
DISTND(N1，N2)	节点 N1 和节点 N2 之间的距离
DISTKP(K1，K2)	关键点 K1 和关键点 K2 之间的距离
DISTEN(E，N)	单元 E 的质心和节点 N 之间的距离。质心由单元上选择的节点确定
ANGLEN(N1，N2，N3)	两条线之间的夹角（由 3 个节点确定，其中 N1 为顶点）。单位默认为弧度
ANGLEK(K1，K2，K3)	两条线之间的夹角（由 3 个关键点确定，其中 K1 为顶点）。单位默认为弧度
NNEAR(N)	最接近节点 N 的节点
KNEAR(K)	最接近关键点 K 的关键点
ENEARN(N)	最接近节点 N 的单元。单元位置由选择的节点确定
AREAND(N1，N2，N3)	由节点 N1，N2 和 N3 围成的三角形的面积
AREAKP(K1，K2，K3)	由关键点 K1，K2 和 K3 围成的三角形的面积
ARNODE(N)	与节点 N 相连的被选择单元在节点 N 上分配的面积。对于二维平面实体，返回与节点 N 相连边界的面积；对于轴对称实体，返回与节点 N 相连边表面的面积；对于三维体实体，返回与节点 N 相连面的面积
NORMNX(N1，N2，N3)	节点 N1，N2，和 N3 确定平面的法线与 X 轴的夹角的余弦值
NORMNY(N1，N2，N3)	节点 N1，N2，和 N3 确定平面的法线与 Y 轴的夹角的余弦值
NORMNZ(N1，N2，N3)	节点 N1，N2，和 N3 确定平面的法线与 Z 轴的夹角的余弦值
NORMKX(K1，K2，K3)	关键点 K1，K2，和 K3 确定平面的法线与 X 轴的夹角的余弦值
NORMKY(K1，K2，K3)	关键点 K1，K2，和 K3 确定平面的法线与 Y 轴的夹角的余弦值
NORMKZ(K1，K2，K3)	关键点 K1，K2，和 K3 确定平面的法线与 Z 轴的夹角的余弦值
ENEXTN(N，LOC)	与节点 N 相连的单元。若有很多单元与节点 N 相连，则由 LOC 定位 列表结束时返回零
NELEM(E，NPOS)	单元 E 中在 NPOS(1-20)位置上的节点号
ELADJ(E，FACE)	与单元 E 的某个表面号(FACE)邻近的单元。面号与面载荷关键号相同。仅仅考虑那些有相同维数和形状的单元。若邻近的单元多于一个，则返回-1，若无邻近单元，返回 0
NDFACE(E，FACE，LOC)	单元 E 的某个表面(FACE)上的 LOC 处的节点。面号与面载荷关键号相同。LOC 指表面上的节点位置（对于 IJLK 表面，LOC=1 指节点 I，2 指节点 J 等）
NMFACE(E)	包含选定节点的单元 E 的表面号。面号输出就是面载荷关键号。如果一个面上出现多个载荷关键号(例如线单元和面单元)，该面上的最小载荷关键号将被输出
ARFACE(E)	对于二维平面实体和三维体实体，返回包含选定节点的单元 E 的表面面积。对于轴对称单元，返回总表面积（360°）
UX(N)	节点 N 在 X 向的结构位移
UY(N)	节点 N 在 Y 向的结构位移
UZ(N)	节点 N 在 Z 向的结构位移
ROTX(N)	节点 N 绕 X 向的结构转角
ROTY(N)	节点 N 绕 Y 向的结构转角
ROTZ(N)	节点 N 绕 Z 向的结构转角
TEMP(N)	节点 N 上的温度
PRES(N)	节点 N 上的压力
VX(N)	节点 N 在 X 向的流动速度

（续）

获取函数	提 取 值
VY(N)	节点 N 在 Y 向的流动速度
VZ(N)	节点 N 在 Z 向的流动速度
ENKE(N)	在节点 N 上的湍流动能(FLOTRAN)
ENDS(N)	在节点 N 上的湍流能量耗散(FLOTRAN)
VOLT(N)	节点 N 处的电压
MAG(N)	在节点 N 上的磁标势
AX(N)	在节点 N 上的 X 向磁矢势
AY(N)	在节点 N 上的 Y 向磁矢势
AZ(N)	在节点 N 上的 Z 向磁矢势

（3）数组参数

变量参数只能存储一个参数值，工程分析所需要的与所产生的数据往往以表的方式更易于理解和管理，ANSYS 的数组参数是能定义成矩阵形式的多维数组，数组参数中的项可以是用户定义的值，也可以是 ANSYS 计算出的值。用户定义的数组可以在 ANSYS 程序中直接输入，也可以从已有的数据文件中读入。

数组参数的类型有 3 种：第一类由简单整理成表格形式的离散数据组成；第二类就是通常所说的表式数组参数表，也是由整理成表格形式的数据组成的，但这种表允许在两个指定的表格项间进行线性插值，另外，表式数组参数表可以用非整数数值作为行和列的下标，这些特性使表式数组参数表成为简化数据输入输出的有力工具；第三类数组参数是字符串，由文字组成。

使用数组参数能简化数据输入，数组参数具有矩阵和向量运算能力，在 ANSYS 运行中，任何时刻数组参数（以及其他参数）都能以 FORTRAN 实数的形式写入文件，写出的文件可用于 ANSYS 其他应用。

定义数组参数有两种途径，利用*DIM 命令或者利用 GUI 菜单定义。

*DIM 命令格式如下。

```
*DIM，Par，Type，IMAX，JMAX，KMAX，Var1，Var2，Var3
```

其中，Par 是数组名；Type 是数组类型，标识字有 ARRAY（默认值）、CHAR、TABLE、STRING；IMAX、JMAX、KMAX 分别是数组下标（I，J，K）的是最大值；Var1、Var2、Var3 是 TABLE 类型数组时对应的行、列、面的变量名。

例如：

```
*DIM，A1，，6
*DIM，A2，ARRAY，3，3
*DIM，A3，，4，5，6
```

采用 GUI 菜单定义数组参数的方法如下：在通用菜单中选择 Parameters>Array Parameters> Define/Edit 命令，弹出定义数组参数对话框，如图 7-2 所示。单击 Add 按钮，弹出定义数组参数对话框如图 7-3 所示，按照说明添加参数，单击 OK 按钮确认，或单击

Apply 按钮继续添加多个数组。

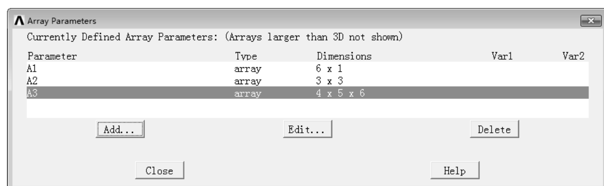


图 7-2　定义数组参数对话框

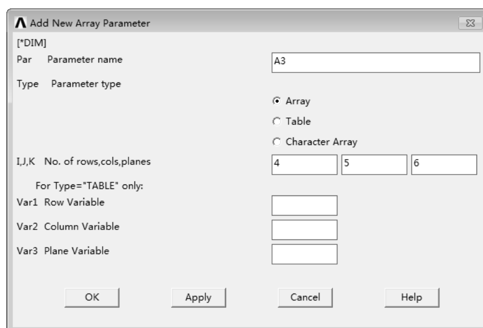


图 7-3　添加新数组参数对话框

或使用“=”命令。例如：

A(1，1)=11
A(2，1)=12

对字符数组，不能以图形方式填充字符串。直接按上述步骤操作会出现如图 7-4 所示警告信息。

使用 “=”命令输入值，接着用 *STAT 显示字符串。每个字符串必须用单引号括起来。

例如：

A(1) = ‘UX’，‘UY’
*STAT，A

得到如图 7-5 所示数组信息。

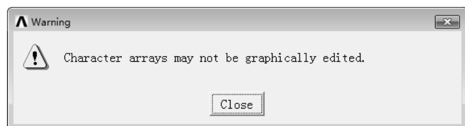


图 7-4　警告信息

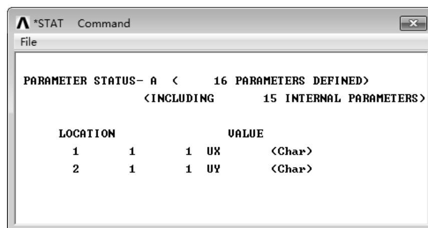


图 7-5　字符数组信息

注意：对于表型数组，必须定义第 0 位置。否则，取默认值 7.889E-31，如图 7-6 所示。

例如：

FORCE(1，1)=0，560，560，238.5，0
FORCE(1，0)=1E-6，0.8，7.2，8.5，9.3
FORCE(0，1)=0

赋值后如图 7-7 所示。

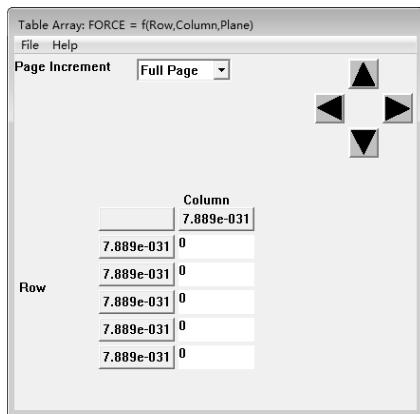


图 7-6 默认状态

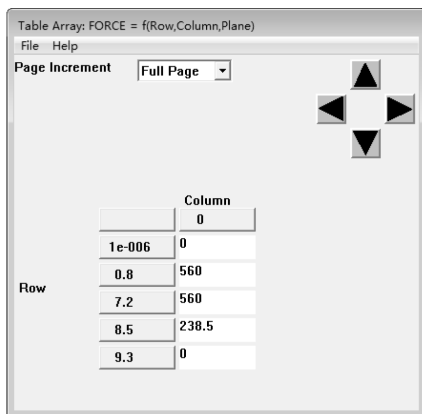


图 7-7 赋值后

用 *VFILL 命令或 GUI 界面中的 Utility Menu > Parameters > Array Parameters > Fill 预定义函数也可以赋值。

从一个文件读入数据也可以给参数赋值。

其中，读取数据的命令中，*VREAD 用于数值数组、*TREAD 用于数据表。在 GUI 界面中为 Utility Menu > Parameters > Read from File。

从数据库也可以获取参数值。正如 *GET 从数据库获取标量数据，可以用 *VGET 获取数组信息，或由 GUI 界面中的 Utility Menu > Parameters > Get Array Data 命令进行操作。先定义数组，然后获取数据。

例如：

```
*dim，dispval，array，20，3              !定义 20×3 array
*vget，dispval(1，1)，node，1，u，x     ! 从点 1 开始将点 1-20 的 UX 值赋予第一列
*vget，dispval(1，2)，node，1，u，y     ! 从点 1 开始将点 1-20 的 UY 值赋予第二列
*vget，dispval(1，3)，node，1，u，z     ! 从点 1 开始将点 1-20 的 UZ 值赋予第三列
```

（4）数组的操作

一旦定义了数组参数，就可以对它们进行各种操作，如图 7-8 所示。

GUI：Utility Menu > Parameters > Array Operations；

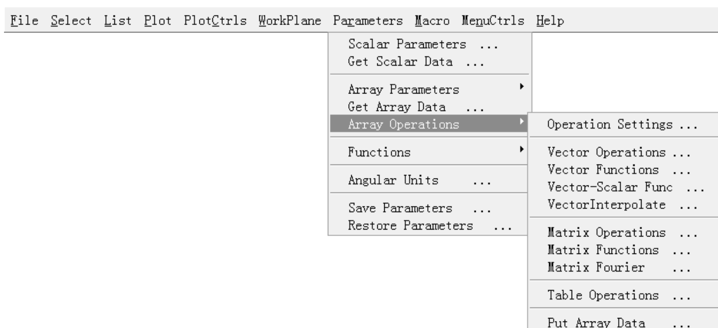


图 7-8 数组的运算

或使用 *VFUN，*VOPER，*VSCFUN，*VWRITE 等命令。

1）对向量的运算。对向量的运算就是按某种顺序对数组元素进行一系列的诸如加、减、求正弦、求余弦、点积、叉乘等运算。

采用向量操作命令-*VOPER，*VFUN，*VSCFUN，*VITRP，*VFILL，*VREAD 和 *VGET。

注意：在这些命令中，只有*VREAD 和*VWRITE 对字符数组参数有效，其余的只能用于 ARRAY 类型或 TABLE 类型（由*DIM 定义）的数组参数。

- *VOPER

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Vector Operations 命令。

对两个输入数组向量进行运算，输出一个数组向量。

例如：*voper，c(1)，a(1)，sub，b(1) ，等价于 c(k)=a(k)−b(k) 。

其他操作包括：加、减、乘、除；最小值、最大值、逻辑运算；微分、积分；点积和叉积。

- *VFUN

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Vector Functions 命令。

对两个输入数组向量执行某函数，输出一个数组向量。

例如，*VFUN 对单个数组操作，*vfun，b(1)，sin，a(1) 等价于 b(j)=sin(a(j)) 。

其他操作包括：自然对数、常用对数、指数；平方根、排序、复制；局部坐标系与整体坐标系的相互转换关系，路径的切线和法线矢量等。

- *VSCFUN

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Vector-Scalar Func 命令。

确定单个输入数组矢量属性，并将结果存放到指定的标量参数中。

例如，*vscfun，maxval，max，a(1)，等价于一个标量 maxval = max(a(i))。

其他操作包括：求数组的所有元素的和；诸如标准偏差，中值，平均数等统计量；最小值/最大值，最小值/最大值的位置；第一个和最后一个非零记录的位置。

- *VWRITE

把数据按格式写进文件，例如:

```
*CFOPEN，WING，DAT
*VWRITE
(/，3X，'NODE NUMBER'，4X，'TEMPERATURE'，/)
*VWRITE，NNUM(1)，TVAL(1)
(5X，F6.0，6X，E14.8)
*CFCLOSE
```

将会创建一个名为 wing.dat 的文件，包含指定格式的 nnum 和 tval 数组。

- *VITRP

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Vector Interpolate 命令。

通过在指定的表下标位置插入一个数组参数（TABLE 类型）来生成一个数组参数（ARRAY 类型）。

2）对矩阵的运算。矩阵运算是一种数字数组参数之间的数学运算，例如矩阵乘法、计算转置矩阵、求解联立方程组等。

与向量的运算相类似，对矩阵的运算命令包括：



- *MOPER

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Matrix Operations 命令。

对两个输入数组参数矩阵进行矩阵运算，输出一个数组参数矩阵。

矩阵运算包括：矩阵相乘，求解联立方程组，对矩阵中的某个指定向量排序（按上升顺序）。

计算两个向量之间的协方差；计算两个向量之间的相关性。

- *MFUN

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Matrix Functions 命令。

复制或转置一个数组参数矩阵（接收一个输入矩阵，生成一个输出矩阵）。

- *MFOURI

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Matrix Fourier 命令。

计算傅里叶级数的系数或求傅里叶级数。

在 ANSYS 命令参考手册（ANSYS Commands Reference）可以得到关于这些命令的详尽介绍，读者初学 APDL 时对为数众多的命令难以记忆，应充分利用 ANSYS 的帮助文件（Product Help）。

所有向量和矩阵运算命令都受到下面这些命令的影响：*VCUM，*VABS，*VFACT，*VLEN，*VCOL，和*VMASK.（在所有命令中，只有*VLEN 和 *VMASK，与*VREAD 或 *VWRITE 连用时，对字符数组参数有效）。可以通过*VSTAT 命令来查看这些命令的状态。

除*VSTAT 命令之外，下面将要介绍的其他所有的命令都可以通过菜单 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Operation Settings 得到。

3）下面列出有效的数组规定命令。

- *VCUM

指定结果累积或不累积（覆盖已有结果）。ParR 为向量运算的结果，要么被加入一个已存在的同名参数中，要么被覆盖。默认为不累积结果，即 ParR 覆盖掉已存在的同名参数。

- *VABS

使向量运算中的某个或所有参数取绝对值。默认为实数值。

- *VFACT

对向量运算中的某个或所有参数乘以一个比例因子。比例因子默认为 1.0。

- *VCOL

指定矩阵运算中列的数目。默认为从指定起始处填满结果数组的所有位置。

- *VSTAT

列出数组参数的当前状态。

- *VLEN

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Operation Settings 命令。

指定数组参数运算中被用到的行的数目。

● *VMASK

或选择 Utility Menu>Parameters>Array Operations>Operation Settings 命令。

指定某个数组作为屏蔽向量。

这些规定命令将对向量和矩阵的运算命令产生影响。其影响关系如表 7-2 所示。

表 7-2　规定命令对运算的影响关系

	*VABS	*VFACT	*VCUM	*VCOL	*VLEN		*VMASK
					NROW	NINC	
*MFOURI	No	No	No	N/A	No	No	No
*MFUN	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
*MOPER	Yes	Yes	Yes	No	Yes	No	Yes
*VFILL	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VFUN	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VGET	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VITRP	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VOPER	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VPLOT	No	No	N/A	N/A	Yes	Yes	Yes
*VPUT	Yes	Yes	No	N/A	Yes	Yes	Yes
*VREAD	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VSCFUN	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	Yes	Yes
*VWRITE	No	No	N/A	N/A	Yes	Yes	Yes

7.1.3 APDL 语言的流程控制

ANSYS 在执行 APDL 语言编写的程序时，采取的是逐行解释并执行指令的方式。复杂的程序经常需要控制指令的执行顺序。为此，APDL 提供了一种接近于 FORTRAN 的流程控制命令。

（1）分支结构

APDL 允许根据条件执行某些供选择的程序体中的一个。条件的值通过比较两个数的值（或等于某数值的参数）来确定。

*IF 命令的语法为：

```
*IF，x，OPER，y，THEN
```

其中，X 和 Y 可以是数字，参数或参数表达式；Oper 是比较运算符。

APDL 提供了 8 个比较运算符，关于它们的详细讨论在*IF 命令参考部分。简要地说，它们主要是：

```
x，EQ，y                    !x=y
x，NE，y                    !x≠y
```

```
x，LT，y                                     !x<y
x，GT，y                                     !x>y
x，LE，y                                     !x≤y
x，GE，y                                     !x≥y
x，ABLT，y                                   !|x|<|y|
x，ABGT，y                                   !|x|>|y|
```

若比较的值为真，则执行 then 指定的操作。之后的操作可能是：

*EXIT　　退出 DO 循环。

*CYCLE　　跳到 DO 循环末端。

这些操作符只有当条件为真时才起作用。否则，ANSYS 将会移至*ELSEIF（若提供），*ELSE（若提供）和*ENDIF。

在最简单的形式中，*IF 命令判断比较的值，若为真，则转向 Base 变量所指定的标识字处。结合一些*IF 命令，将能得到和其他编程语言中 CASE 语句相同的功能。注意，不要转向某个位于 if-then-else 结构或 do 循环中的带标识字的行。

通过给 THEN 变量赋值 STOP，可以离开 ANSYS。

if-then-else 结构仅仅判断条件并执行接下来的程序体或跳到*ENDIF 命令的下一条语句处（用 Continue 注释表示）：

```
*IF，A，EQ，1，THEN
!Block1
*ENDIF
!Continue
```

（2）循环结构

*REPEAT 命令是最简单的循环命令，通过它可以直接按指定的次数执行上一条命令，并按常数增加命令所带参数。例如：

```
E，1，2
*REPEAT，5，0，1
```

E 命令在节点 1 和 2 之间生成一个单元，*REPEAT 命令指示执行 E 命令 5 次（包括最初的一次），每执行一次第二个节点号加 1。结果共生成 5 个单元：1-2，1-3，1-4，1-5 和 1-6。

注意：大多数以斜线(/)或星号(*)开头的命令，以及扩展名不是.mac 的宏，都不可以重复调用。但是，以斜线(/)开头的图形命令可以重复调用。同时，要避免对交互式命令使用*REPEAT 命令，诸如那些需要拾取或需要用户响应的命令。

DO 循环允许执行一个命令块数次。

实际上在 DO 循环中对其中包含什么内容没有限制。可以包含任何 ANSYS 命令（包括前处理，求解和处理），当然是在条件允许的情况下。

*DO 开始循环，*ENDDO 结束循环。

提示： 可以用*EXIT（退出循环）和*CYCLE（跳到 DO 循环末）控制循环。*EXIT 和*CYCLE 也可以根据 if-then 的结果来执行。

在构造 do 循环时，要遵循以下原则。

- 不要通过在*IF 或 *GO 命令中带有 Label 来从 do 循环结构中跳出。
- 不要在 do 循环结构中用 Label 来跳到另外一行语句。可以用 if-then-else-endif 结构来代替。
- 在 do 循环结构中，第一次循环后，自动禁止命令结果输出。如果想得到所有循环的结果输出，就在 do 循环结构中使用/GOPR 或/GO（无响应行）命令。

常用的流程控制命令列于表 7-3 中，以供读者参考，更为详细的介绍请读者参考 ANSYS 的帮助文件。

表 7-3 控制函数表

APDL 命令	作　用	用 法 提 示
*DO	定义循环开始。紧接*DO 之后的命令（在*ENDDO 之前）反复执行，直到满足循环控制条件	命令格式为*DO，Par，IVAL，FVAL，INC。其中，Par 是用作循环指标的标量参数；IVAL 和 FVAL 是参数 Par 的初始和最终的值；INC 为每循环一次，IVAL 的增量 可以通过*IF 命令来控制循环 ANSYS 允许最多嵌套 20 层的 do 循环，但是包含/INPUT，*USE，或"未知命令"宏的 do 循环支持少一些的嵌套层数，这是因为这些命令会进行内部的文件转换。在 do 循环中不要包含拾取操作 在 do-loop 结构中使用/CLEAR 命令要特别小心。/CLEAR 命令不会清除 do-loop 堆栈，但是它会删除所有的参数，包括在本身的*DO 语句中的循环参数。为避免由此引发的循环值未定义的问题，可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令，然后接着/CLEAR 命令运行/PARRES 命令
*ENDDO	结束一个 do 循环，并开始下一个循环	对每一个嵌套的 do 循环都要有一个*ENDDO 命令。一个循环的*ENDDO 和*DO 命令必须在同一个文件中
*CYCLE	执行 do 循环时，ANSYS 程序绕过所有在*CYCLE 和*ENDDO 之间的命令，然后开始下一个循环	可以有条件地使用 cycle 选项（通过*IF 命令） *CYCLE 命令必须和*DO 命令处于同一文件中，并且在*ENDDO 命令之前
*EXIT	跳出 do 循环	该命令执行紧接着*ENDDO 命令之后的下一行。一个循环的*EXIT 和*DO 命令必须在同一个文件中。可以有条件地使用 exit 选项（通过*IF 命令）
*IF	按条件执行命令	命令格式为：*IF，VAL1，Oper，Val2，Base。其中，VAL1 是比较的第一个数值（或数字参数）；Oper 是比较运算符：EQ (等于)，NE (不等于)，LT (小于)，GT (大于)，LE (小于或等于)，GE (大于或等于)，ABLT (绝对值小于) 或 ABGT (绝对值大于)；VAL2 是比较的第二个数值（或数字参数）；若比较的结果为真，则执行 Base ，若为假，则执行下一条语句。Base 可能为： - :label (跳到以标识字 label 开头的语句处) - STOP (跳出 ANSYS 程序) - EXIT (跳出当前的 do 循环) - CYCLE (跳到当前 do 循环的结束处) - THEN (构造 if-then-else 结构) *IF 程序体最多可嵌套 10 层。不能在"do"循环或 if-then-else 结构中跳到某个:label 行。可以在 if-then-else 结构中执行/CLEAR 命令。/CLEAR 命令不会清除*IF 堆栈，*IF 层的号码仍然保留。必须用*ENDIF 来结束逻辑分支。同时，要记住/CLEAR 命令会删除所有的参数，包括在分支命令中使用的任何参数。为避免由于删除参数而引发问题，可以在/CLEAR 命令前运行/PARSAV 命令，然后接着/CLEAR 命令运行/PARRES 命令

（续）

APDL 命令	作　用	用 法 提 示
*ENDIF	终止 if-then-else 结构	*IF 和*ENDIF 命令必须处于同一文件中
*ELSE	在 if-then-else 结构中生成最后一个可选择的程序体	*ELSE 和*ENDIF 命令必须处于同一文件中
*ELSEIF	在 if-then-else 结构中生成一个可选择的中间程序体	命令格式为*ELSEIF，VAL1，Oper，VAL2。其中，VAL1 是比较的第一个数值（或数字参数）；Oper 是比较运算符：EQ (等于)，NE (不等于)，LT (小于)，GT (大于)，LE (小于或等于)，GE (大于或等于)，ABLT (绝对值小于) 或 ABGT (绝对值大于)；VAL2 是比较的第二个数值（或数字参数）；如果 Oper=EQ 或 NE，VAL1 和 VAL2 可以是字符串 (括在单引号中) 或参数 *IF 和 *ELSEIF 命令必须处于同一文件中

7.1.4 宏文件

宏文件可视为用户自行定义的一段程序，包括一系列 ANSYS 命令流，扩展名一般为.mac。宏文件常用于记录一系列复杂的或常用的命令流，可以将其文件名作为自定义的命令使用，但应该注意不能与已有的 ANSYS 命令重复，否则将被忽略并指行原有内部命令。

（1）创建宏文件

创建宏文件一般有两种方法，即使用命令或使 GUI 界面。

使用 GUI 界面创建宏文件的方法如下。

在通用菜单中选择 Macro> Create Macro 命令，弹出如图 7-9 所示的 Create Macro 对话框，在 Macro file name 后的文本框中输入宏文件的文件名，在下面的文本框中输入文件内容，单击 OK 按钮就可以在当前工作目录下找到刚才所定义的宏文件。

在工作目录下找到 macro1.mac，用记事本打开，如图 7-10 所示即为刚生成的宏文件。

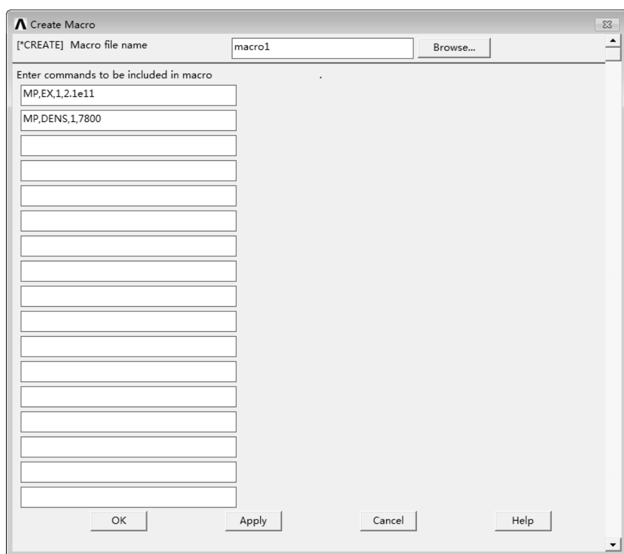


图 7-9　Create Macro 对话框

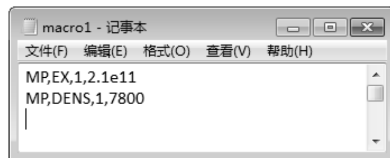


图 7-10　宏文件 macro1

常用的创建宏文件有命令有*CREATE、*CFOPEN、*CFWRITE、*CFCLOS、/TEE。命令格式如下。

*CREATE，Fname，Ext，--

其中，Fname 是宏文件名与路径，当不指定路径时默认为当前工作目录；Ext 是文件扩展名；--无需定义。

*CFOPEN，Fname，Ext，--，Loc

其中，Fname、Ext 与*CREATE 相同；Loc 用于决定是覆盖同名文件或增加内容，Loc 为空时将覆盖同名文件，Loc=APPEND 时向同名文件增内容。

```
*CFWRITE，Command
```

*CFWRITE 需要与*CFOPEN 命令配合使用，例如在命令输入窗口中输入：

```
*CFOPEN，macro1，mac
*CFWRITE，X001=10
*CFWRITE，Y001=8
*CFWRITE，X001=12
*CFCLOS
```

则生成的宏文件如图 7-11 所示。

需要注意的是*CFWRITE 命令只能与*CFOPEN 命令配合使用，如单独使用则会弹出如图 7-12 所示错误提示。

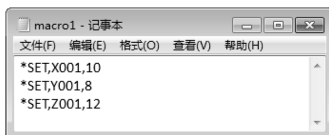


图 7-11　由*CFWRITE 命令编辑的宏文件

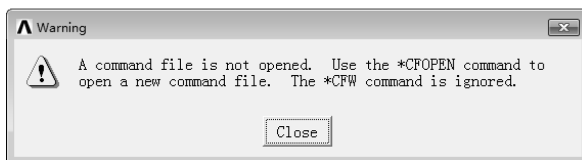


图 7-12　单独使用*CFWRITE 命令弹出的警告

/TEE 命令格式如下。

```
/TEE，Label，Fname，Ext，--
```

其中，Fname、Ext、--同上述命令；Label 是/TEE 命令的操作标识字，当 Label=NEW 时，创建一个新的宏文件，如有同名则覆盖，当 Label=APPEND 则向同名文件增加内容，当 Label=END 则关闭刚才打开的文件。

（2）调用宏文件

宏文件可以互相嵌套调用，但最多不得超过 20 层。在宏命令中，可由*ASK 命令根据用户说明信息提示参数。在宏文件内部使用*MSG 命令允许将参数和用户提供的信息写入用户可控制的、有输出的文件，这些信息可以是一个简单注释、警告、错误信息等，甚至可以是一个致命的错误信息，这就允许 ANSYS 在内部创建报告或生成可用外部程序读取的输出文件。

ANSYS 程序提供了一些预先编写好的宏文件，它们位于…\ansys_inc\v140\ANSYS\apdl 文件夹内，用户可以直接调用这些宏文件。

在 ANSYS 中调用宏如下 3 种方式。

- *USE，macroname。

- macroname。
- /INPUT，'macroname'，，，，0。

用户在为自己编写的宏文件命名之前，可先在命令输入框中输入要创建的宏文件的文件名并按〈Enter〉键，弹出如图 7-13 所示的警告对话框，则说明当前没有与用户所选用的文件名重复的宏文件，该名称可以使用。

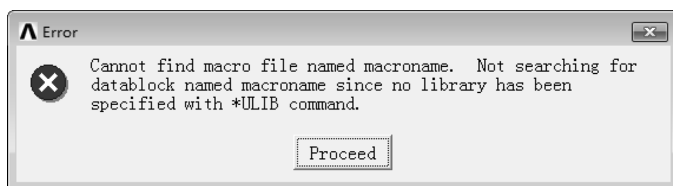


图 7-13　执行未知命令的错误提示框

7.1.5 函数、运算符以及常用控制命令

（1）函数与运算符

APDL 为用户提供了基本的数学运算符号，简要列于表 7-4 中。

表 7-4　数学运算符

运　算　符	操　　作
+	加
-	减
*	乘
/	除
**	乘方
>	大于
<	小于

APDL 提供的数学运算符优先级与 FORTRAN 相同，有编程经验的用户可以方便地熟悉。

表 7-5 列出了一些 ANSYS 中的常用函数及简介，方便用户参考。

表 7-5　ANSYS 常用函数

函 数 名 称	简　　介
SIN（x）	返回 x 的正弦值，x 的默认单位为弧度，可用*AFUN 指定为角度
COS（x）	返回 x 的余弦值，x 的默认单位为弧度，可用*AFUN 指定为角度
TAN（x）	返回 x 的正切值，x 的默认单位为弧度，可用*AFUN 指定为角度
SINH（x）	返回 x 的双曲正弦值，x 的默认单位为弧度，可用*AFUN 指定为角度
COSH（x）	返回 x 的双曲余弦值，x 的默认单位为弧度，可用*AFUN 指定为角度
TANH（x）	返回 x 的双曲正切值，x 的默认单位为弧度，可用*AFUN 指定为角度
ASIN（x）	返回 x 的反正弦，-1.0<x<1.0，返回值默认为弧度，可用*AFUN 指定为角度
ACOS（x）	返回 x 的反余弦，-1.0<x<1.0，返回值默认为弧度，可用*AFUN 指定为角度

（续）

函 数 名 称	简　　介
ATAN（x）	返回 x 的反正切，-1.0<x<1.0，返回值默认为弧度，可用*AFUN 指定为角度
ATAN2（y，x）	返回 y/x 的反正切，返回值默认单位为弧度，可用*AFUN 指定为角度
LOG（x）	返回 lnx
LOG10（x）	返回 lgx
SQRT（x）	返回 x 的平方根
MINT（x）	返回最接 x 的取整
MOD（x，y）	返回 x/y 的余数，当 y=0 时返回 0
RAND（x，y）	产生以 x 为上界、y 为下界的随机数
GDIS（x，y）	产生以 x 为均值、y 为方差的正态分布的随机数
ABS（x）	返回 x 的绝对值
SIGN（x，y）	x 绝对值不变，符号修改为与 y 同号，当 y=0 时取正
EXP（x）	返回 ex
VALCHR（CPARM）	返回 CPARM 的数字值，如果 CPARM 不是数字则返回 0.0
CHRVAL（PARM）	返回数字参数 PARM 的字符值
UPCASE（CPARM）	将 CPARM 置为大写字符串
LWCASE（CPARM）	将 CPARM 置为小写字符串

在通用菜单中选择 Parameters> Functions> Define/Edit 命令，弹出如图 7-14 所示对话框。

函数编辑器用于定义方程与控制条件，可以建立单个方程或一个函数，函数可以由一系列方程联立而成，每个方程对应特定的状态控制区间，最终作为边界条件，对分析模型产生重大影响。

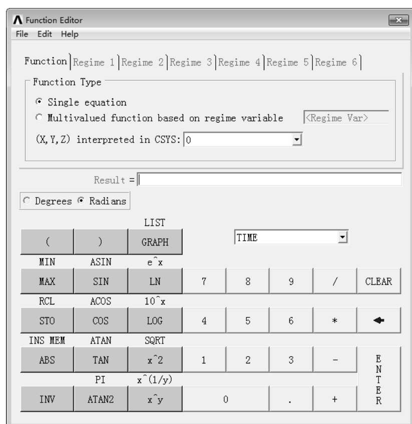


图 7-14　函数编辑器窗口

（2）常用控制命令

前文的介绍中或多或少对一些命令已经有所涉及，今后的实例介绍还将大量地涉及命令，为方便读者查阅理解，也保证下文讲述的连贯性，在此对一些常用命令进行介绍。

1）基本应用与建模。

FIHI（FINISH）!退出处理器。

/CLEAR!清空所有数据。

以上两个指令常同时出现于命令流文件的开头，用于清空数据防止意外残留的其他工作信息的干扰。

/PREP7!进入前处理器。

K，NPT，X、Y、Z

其中，指令 K 用于在工作区指定坐标位置创建关键点；NPT 为关键点编号。默认将新创建的关键点编号设置为当前最大编值加 1。X、Y、Z 是关键点坐标，默认为 0。

L，P1，P2，NDIV，SPACE，XV1，YV1，ZV1，XV2，YV2，ZV2

其中，指令 L 用于连接工作区内的两个关键点创建一条线，可以为直线或曲线；XV1、

YV1、ZV1、XV2、YV2、ZV2 分别是两个关键点处在 X、Y、Z 方向上的切线斜率，全为 0 时 L 创建的为直线；P1、P2 是被连接的两个关键点编号。当 P1=P 时，激活在 GUI 中拾取功能，其后的项目均被略去。

A，P1，P2，P3，P4，P5，P6，P7，P8，P9，P10，P11，P12，P13，P14，P15，P16，P17，P18

其中，指令 A 用于连接数个关键点创建一个面，可由 3～18 个点连接围成面。

CYL4，XCENTER，YCENTER，RAD1，THETA1，RAD2，THETA2，DEPTH

其中，指令 CYL4 用于创建一个圆柱；XCENTER、YCENTER 用于指定圆心坐标；RAD1、RAD2 为两个圆端面的半径，即该指命令也可以创建圆台、圆锥；

BLC4，XCORNER，YCORNER，WIDTH，HEIGHT，DEPTH

其中，指令 BLC4 用于创建一个长方体，通过一个顶点的坐标（XY 面内）、XY 面内的长度、宽度及 Z 方向上的深度控制其形状与位置。

ANSYS 有这样一类命令，它们互相类似，作用效果相同，但作用于不同对象，如 ASEL 与 VSEL，前者用于面的选择，后者用于体的选择，两者用法与参数类似，对于这一类命令将其归类统一说明。

ANSYS 中的几何元素在程序中都有对应的代号，如表 7-6 所示。参照此表，将对应的字符代入表 7-7 中 X 的位置，即为 ANSYS 中对于节点、点、线、面、体等的操作命令。

表 7-6 对象名称

名称	关键点	线	面	体	节点	单元
符号（X）	K	L	A	V	N	E

表 7-7 常用命令

命　　令	用　　途
XSEL	选择对象
XMESH	划分网格
XDELE	删除对象
XPLOT	在工作区中显示对象
XLIST	列出对象
XGEN	复制对象
XCLEAR	清除对象
XADD	布尔运算加
XSUB	布尔运算减
XGLUE	布尔运算合并
XSUM	计算对象几何信息

2）网格划分。

ET，ITYPE，Ename，KOP1，KOP2，KOP3，KOP4，KOP5，KOP6，INOPR！定义单元类型

其中，ITYPE 为用户自行定义的单元类型编号；Ename 为单元号，如 LINK180，BEAM188 等；KOP1~KOP6 为单元描述选项。

R，NSET，R1，R2，R3，R4，R5，R6!定义实常数

其中，NSET 为实常数组号；R1~R6 为实常数参数值；

MP，Lab，MAT，C0，C1，C2，C3，C4!定义材料属性

其中，Lab 为材料性标识，可以取如下值；MAT 为材料组号，由用户定义；C0~C4 分别为材料属性值的零次项（常数项）至四次项。

ESIZE，SIZE，NDIV!定义单元尺寸

其中，SIZE 为模型中最大的单元边长；NDIV 为每条线被分成的份数。

以上两个参数只用指定其一。

AESIZE，ANUM，SIZE!面单元尺寸控制

其中，ANUM 为需要进行控制的面的编号。

LESIZE，NL1，SIZE，ANGSIZ，NDIV，SPACE，KFORC，LAYER1，LAYER2，KYNDIV

其中，NL1 为需要进行控制的线的编号；SIZE、NDIV 为指定分割的尺寸或份数，两者只定义其一；ANGSIZ 为将曲线按角度分割，仅在 SIZE 与 NDIV 为空时有效；SPACE 为分段的间隔比率。

KESIZE，NPT，SIZE，FACT1，FACT2

其中，NPT 为指定设置的关键点；SIZE 为设置划分尺寸；

DESIZE，MINL，MINH，MXEL，ANGL，ANGH，EDGMN，EDGMX，ADJF，ADJM

其中，MINL 为当使用低阶单元时每条线上的最小单元数，默认为 3；MINH 为当使用高阶单元时每条线上的最小单元数，默认为 2；ANGL 为曲线上低阶单元的最大跨角，默认为 15°；ANGH 为曲线上高阶单元的最大跨角，默认为 28°；EDGMN 为最小的单元边长，默认不设置；EDGMX 为最大的单元边长，默认不设置；ADJF 为仅在自由网格划分时，相近线的预定纵横比。对 h 单元默认为 1（等边长），对 p 单元默认为 4；ADJM 为仅在映射网格划分时，相近线的预定纵横比。对 h 单元默认为 4（矩形），对 p 单元默认为 6。

SMRTSIZE，SIZLVL，FAC，EXPND，TRANS，ANGL，ANGH，GRATIO，SMHLC，SMANC，MXITR，SPRX

其中，SIZLVL 为网格划分时的总体单元尺寸等级，其值控制网格的疏密程度。可取如下值。

- N：智能单元尺寸等级，此时其他参数无效，值为 1~10。
- STAT：列表输出 SMRTSIZE 设置状态。
- DEFA：恢复默认的 SMRTSIZE 设置。
- OFF：关闭智能网格划分。

FAC 为用于计算默认网格尺寸缩放因子，默认设置为 1；EXPND 为网格扩展或收缩系数；TRANS 为网格过渡系数；ANGL 为曲线上低阶单元的最大跨角，默认为 22.5°；ANGH 为曲线上高阶单元的最大跨角，默认为 30°；GRATIO 为相邻性检查的允许增长率，取值范围为 1.2~5.0；SMHLC 为小孔的粗糙控制参数；SMANC 为小角度的粗糙控制参数；MXITR 为尺寸迭代的最大次数，默认为 4；SPRX 为相邻面细化控制参数。

VCLEAR，NV1，NV2，NINC!清除网格。

其中，NV1、NV2 为将 NV1～NV2 的所有体作为清除对象；NINC 为体编号的增量。

ACLEAR，NA1，NA2，NINC

其中，NV1、NV2 为将从 NV1 到 NV2 的所有体作为清除对象；NINC 为面编号的增量。

3）加载与求解。

D，NODE，Lab，VALUE，VALUE2，NEND，NINC，Lab2，Lab3，Lab4，Lab5，Lab6



其中，D 用于为选中节点施加自由度约束；NODE 为施加约束的节点号，可以使用 ALL 或组件名；Lab 为自由度标识符，如 ROTX、UX 等，如使用 ALL 将约束所有效自由度；VALUE 为自由度约束位移值或表型数组名称。

命令 D 可用于给定义某些节点一个初值，而不对其之后的行为产生影响。具体方法为：先用 D 命令定义某一自由度值，随后立即用 DDELE 命令将删除。

F，NODE，Lab，VALUE，VALUE2，NEND，NINC

其中，F 用于为选定节点施加集中载荷；NODE 为将要加载的节点编号，也可以使用 ALL 或组件名；Lab 为集中载荷识符，如 FY、MX 等；VALUE 为集中载荷值或表型数组名称。

SF，Nlist，Lab，VALUE，VALUE2

其中，SF 用于对一系列节点施加面载荷；Nlist 为节点列表，可以使用 ALL 或组件名，即加载的对象；Lab 为面载荷标识符，如结构分析中的 PRES；VALUE 为面载荷值或表型数组名称；VALUE2 为复数输入时面载荷的虚部值。

SFE，ELEM，LKEY，Lab，KVAL，VAL1，VAL2，VAL3，VAL4

其中，SFE 命令用于在单元上施加面载荷；ELEM 为单元号，也可以使用 ALL 或组件名；LKEY 为与面载荷相关的载荷控制参数，默认为 1。详见具体单元帮助；Lab 为面载荷标识符，结构分析中为 PRES；KVAL 为确定 VAL1~4 为实部或虚部；VAL1 为第一个面载荷值或表型数组名称；VAL2~4 为面上节点的其余面载荷值；

LDREAD，Lab，LSTEP，SBSTEP，TIME，KIMG，Fname，Ext，--

其中，LDREAD 用于施加耦合场载荷，在多场耦合分析中非常常用；Lab 为载荷标识符，可以取如下值。

- TEMP 为来自热分析的温度值。
- PRES 为来自 FLOTRAN 分析中的压力。
- REAC 为来自任何分析中的支座反力。

LSTEP 为将要读入的载荷步数，默认为 1；SBSTEP 为在 LSTEP 载荷步内的子步数，空或 0 表示最后一个子步；TIME 为当 LSTEP 与 SUBSTEP 均为空时，将要读入的时间点；KIMG 为当来自于谐分析的结果时，该项参数控制读入实部或虚部数据；Fname 为目录及文件名。默认为当前工作目录下的工作文件名；Ext 为文件扩展名，默认为 RST。

4）*GET 命令。

*GET 命令用于检索一个值将并它存储为一个标量参数或数组参数的一部分。*GET 命令可以方便地提取数据，既可以用于后处理中，也可以用于前处理。

无论在建模、划分网格、加载求解还是求解完成的后处理中，能够熟练运用*GET 命令随心所欲地提取数据，标志着读者已经步入高阶 ANSYS 用户行列。

接下来将对*GET 命令进行详细介绍，其格式如下。

*GET，Par，Entity，ENTNUM，Item1，IT1NUM，Item2，IT2NUM

其中，Par 为*GET 命令所产生的参数的名称；Entity 为实体名称，如 NODE、LEM、KP、LINE、AREA、VOLU、PDS 等；ENTNUM 为实体的编号或标识符。0（或空白）代表所有实体；Item1 为实体项目名称；IT1NUM 为指定 Item1 的编号或标识符（如有）。一些 Item1 的标识符不需要 IT1NUM 的值；Item2、IT2NUM 为第二组的项目标识符和编号，以进一步限定的项目要检索数据。大多数项目不需要这样的信息级别。

* GET 检索指定项目并存储为一个标量参数，或者作为用户命名数组中的一个值。项目由不同关键字、标识符和数字组合确定。除了该参数值从先前输入或计算结果中检索的，与 * SET 命令用法类似。例如下列命令。

*GET，A，ELEM，5，CENT，X !提取 5 号单元的重心 X 坐标值并作为参数 A 的值进行存储

除非单独说明，*GET 命令提取的坐标值总是基于当前激活的坐标系的。

如表 7-8 所示，Entity = ACTIVE，ENTNUM = 0 （or blank）所示，为当 Entity = ACTIVE 时，*GET 命令在前处理器中各参数的含义。

表 7-8　Entity = ACTIVE，ENTNUM = 0 （or blank）

Item1	IT1NUM	描　　述
CSYS		激活的坐标系
DSYS		激活的显示坐标系
MAT		激活的材料属性
TYPE		激活的单元类型
REAL		激活的实常数设置
ESYS		激活的单元坐标系
SECT		激活的截面设置
CP		模型中的耦合节点组数的最大值（在被压缩之前包含删除、合并的节点）
CE		模型中的约束方程个数的最大值（在被压缩之前包含删除、合并的约束方程）
WFRONT	MAX，RMS	电流最大值或 RMS 波阵面。如果没有完成重新排序则取 0

如表 7-9 所示，当 Entity = AREA，ENTNUM = N （area number）时，在前处理器中 *GET 命令的使用。

表 7-9　Entity = AREA，ENTNUM = N （area number）

Item1	IT1NUM	描　　述
ATTR	标识符	标识符项目编号。标识符可取 MAT，TYPE，REAL，ESYS，KB，KE，SECN，NNOD，NELM，or ESIZ（NNOD=节点号，NELM=单元号，ESIZ=单元尺寸）
ASEL		面选择的状态。N=-1 =未选择，N=0=未定义，N=-1=已选择
NXTH		比 N 小的最大面编号（未找到则取 0）
NXTL		比 N 大的最小面编号（未找到则取 0）
AREA		N 号面的面积
LOOP	1，2，…，I	围成闭合环的 I 的线号

当 Entity = AXIS，ENTNUM = 0 （or blank）时，*GET 命令的用法如表 7-10 所示。

表 7-10　Entity = AXIS，ENTNUM = 0 （or blank）

Item1	IT1NUM	描　　述
COUNT	--	已定义的截面参数个数
NUM	MAX	截面参数编号的最大值

当 Entity = AXIS，ENTNUM = 轴截面编号时，*GET 命令的用法如表 7-11 所示。

表 7-11　Entity = AXIS，ENTNUM = 轴截面编号

Item1	IT1NUM	描　　述
TYPE	--	截面类型
NAME	--	指定编号的截面名称
DATA	nnn	指定编号的截面位置

当 Entity = CDSY，ENTNUM =坐标系号时，*GET 在前处理器中的使用如表 7-12 所示。

表 7-12　Entity = CDSY，ENTNUM =坐标系号

Item1	IT1NUM	描　　述
LOC	X、Y、Z	原点在全局笛卡儿坐标系中的位置
ANG	XY，YZ，ZX	相对全局的笛卡儿坐标系 THXY、THYZ、或 THZX 旋转角度
ATTR	Name	Name 的编号，Name 可取 KCS、KTHET、KPHI、PAR1、PAR2，如果坐标系未定义则返回-1.0
NUM	MAX	坐标系号的最大值

当 Entity = CE，ENTNUM = N （约束方程号）时，*GET 在前处理器中的使用如表 7-13 所示。

表 7-13　Entity = CE，ENTNUM = N （约束方程号）

Item1	IT1NUM	描述
当 N = 0		
MAX		约束方程最大编号
NUM		约束方程编号
当 N > 0		
NTERM		约束方程条件的个数
CONST		约束方程的常项
TERM	number	Item2 = NODE：约束方程中在此位置的节点号
		Item2 = DOF：此位置的约束方程的自由度数
		Item2 = COEF：此位置的约束方程的系数

当 Entity=CMPB，ENTNUM=N（复合梁截面编号）时，*GET 命令的使用如表 7-14 所示。

表 7-14 Entity = CMPB，ENTNUM = N（复合梁截面编号）

Item1	IT1NUM	描　述
COUNT		已定义的截面个数，如果 Item1=COUNT，那么 N 是空白
NUM	MAX	截面编号最大值，如果 IT1NUM=MAX，那么 N 是空白
EXIS		如果截面存在且它是一个 CMPB 截面，则返回 1
NAME		通过 SECTYPE 命令定义的 8 个字符的截面名称
CBMX、CBTE、CBMD 之一		Item2 = NTEM （ CBMX、CBTE、CBMD 数据的温度编号）
CBMX、CBTE、CBMD 之一		Item2 = TVAL，IT2NUM = nnn，nnn 是温度值（<= NTEM）
CBMX、CBTE、CBMD 之一	nnn	Item2 = TEMP； IT2NUM = tval，其中 nnn 是 CBMX、CBTE、CBMD 数据中的给定系数的位置，tval 是温度值

当 Entity = CP，ENTNUM = N（耦合节点集）时，*GET 命令的使用如表 7-15 所示。

表 7-15 Entity = CP，ENTNUM = N（耦合节点集）

Item1	IT1NUM	描　述
N = 0		
MAX		耦合集编号最大值
NUM		耦合集个数
N > 0		
DOF		该耦合集的自由度
NTERM		该耦合集的节点数
TERM	number	Item2 = NODE：给出该位置耦合节点号

当 Entity = CSEC，ENTNUM = 0 时，*GET 命令的使用如表 7-16 所示。

表 7-16 Entity = CSEC，ENTNUM = 0

Item1	IT1NUM	描　述
COUNT	—	已定义的接触面数
NUM	MAX	最大接触面编号

当 Entity = CSEC，ENTNUM = ID （接触面编号）时，*GET 命令的使用如表 7-17 所示。

表 7-17 Entity = CSEC，ENTNUM = ID（接触面编号）

Item1	IT1NUM	Description
TYPE	—	接触面类型
NAME	—	指定编号的接触面名称
DATA	nnn	nnn 是 SECDATA 命令中指定编号的接触面的名称

当 Entity = EDCC，ENTNUM = N （接触实体编号，由 EDCLIST 获得）时，*GET 命令的使用如表 7-18 所示。

表 7-18 Entity = EDCC，ENTNUM = N（接触实体编号，由 EDCLIST 获得）

Item1	IT1NUM	描　述
COMP	1，2	接触实体 N 的接触面（1）或目标面（2）的组件名
PART	1，2	接触实体 N 的接触面（1）或目标面（2）的零件名

当 Entity = ELEM，ENTNUM = N （单元号）时，*GET 命令的使用如表 7-19 所示。

表 7-19 Entity = ELEM，ENTNUM = N（单元号）

Item1	IT1NUM	描　述
NODE	1，2，…，20	单元节点号
CENT	X、Y、Z	质心坐标
ADJ	1，2，…，6	相邻面编号
ATTR	Name	标识符 Name 的编号，Name = MAT、TYPE、REAL、ESYS、PSTAT、LIVE、SECN
LENG		一维单元长度
LPROJ	X、Y、Z	一维单元投影长度
AREA		面单元面积
APROJ	X、Y、Z	面单元投影面积
VOLU		单元体积
ESEL		单元选择状态。N=-1 表示未选，N=0 表示未定义，N=1 表示已选
NXTH		N 以上的最小单元号（未找到则返回 0）
NXTL		N 以下的最大单元号（未找到则返回 0）
HGEN		单元 N 的产热量
HCOE	face	指定表面上的单元的传热系数
TBULK	face	指定表面上的单元的总体温度
PRES	face	指定表面上的单元的压力
SHPAR	Test	单元形状参数

当 Entity = ELEM，ENTNUM = 0 时，*GET 命令的使用如表 7-20 所示。

表 7-20 Entity = ELEM，ENTNUM = 0

Item1	IT1NUM	描　述
NUM	MAX，MIN	最大单元编号
NUM	MAXD，MIND	最小单元编号
COUNT		单元个数

当 Entity = KP，ENTNUM = N （关键点号）时，*GET 命令的使用如表 7-21 所示。

表 7-21 Entity = KP，ENTNUM = N（关键点号）

Item1	IT1NUM	描 述
LOC	X、Y、Z	关键点坐标
ATTR	Name	标识符 Name 对应的编号，Name = MAT，TYPE，REAL，ESYS，NODE，ELEM
KSEL		关键点选择状态
NXTH		N 以上最小的关键点号
NXTL		N 以下最大的关键点号
DIV		KESIZE 划分的单元分数

当 Entity = KP，ENTNUM = 0 时，*GET 命令的使用如表 7-22 所示。

表 7-22 Entity = KP，ENTNUM = 0

Item1	IT1NUM	描 述
NUM	MAX，MIN	选中集中关键点号最大/最小值
NUM	MAXD，MIND	已定义的关键点最大/最小编号
COUNT		选中集中关键点个数
CENT	X、Y、Z	质心坐标
IOR	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	原点惯性矩
IMC	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	质心惯性矩
IPR	X、Y、Z	主惯性矩
IXV	X、Y、Z	主惯性矩 X 分量
IYV	X、Y、Z	主惯性矩 Y 分量
IZV	X、Y、Z	主惯性矩 Z 分量
MXLOC	X、Y、Z	选中集中坐标值最大的关键点
MNLOC	X、Y、Z	选中集中坐标值最小的关键点
NRELM	m	最靠近重心的单元的关键点数

当 Entity = LINE，ENTNUM = N （线号）时，*GET 命令的用法如表 7-23 所示。

表 7-23 Entity = LINE，ENTNUM = N（线号）

Item1	IT1NUM	描述
KP	1，2	在 1、2 处的关键点（即线的两端）
ATTR	Name	根据标识符 Name 选出的线号，Name=MAT、TYPE、REAL、ESYS、NNOD、NELM、NDIV、NDNX、SPAC、SPNX、KYND、KYSP、LAY1、LAY2
LSEL		选择状态
NXTH		不大于 N 最大的线号
NXTL		不小于 N 最小的线号
LENG		线的长度

当 Entity = LINE，ENTNUM = 0 （或空白）时，GET 命令的用法如表 7-24 所示。

表 7-24　Entity = LINE，ENTNUM = 0（或空白）

Item1	IT1NUM	描　　述
NUM	MAX，MIN	选中集中最大/最小线号
NUM	MIND，MAXD	已定义最大/最小线号
COUNT		选中集中线数
LENG		选中线的总长度
CENT	X、Y、Z	质心坐标
IOR	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	原点惯性矩
IMC	X、Y、Z，XY，YZ，ZX	重心惯性矩
IPR	X、Y、Z	主惯性矩
IXV	X、Y、Z	惯性矩 X 分量
IYV	X、Y、Z	惯性矩 Y 分量
IZV	X、Y、Z	惯性矩 Z 分量

当 Entity = NODE，ENTNUM = N （节点号）时，*GET 命令的使用如表 7-25 所示。

表 7-25　Entity = NODE，ENTNUM = N（节点号）

Item1	IT1NUM	描　　述
LOC	X、Y、Z	节点坐标
ANG	XY，YZ，ZX	THXY、THYZ、THZX 转角
NSEL		选择状态
NXTH		不大于 N 最大的节点号
NXTL		不小于 N 最小的节点号
F	FX，MX，…	节点 N 处的集中载荷值
D	UX，ROTX，…	节点 N 处的约束值
HGEN		节点 N 处的热生成量
NTEMP		节点 N 处的温度
CPS	Lab	耦合节点集的标识符

当 Entity = NODE，ENTNUM = 0 （或空白）时，*GET 命令的使用如表 7-26 所示。

表 7-26　Entity = NODE，ENTNUM = 0（或空白）

Item1	IT1NUM	描　　述
NUM	MAX，MIN	选中集的最大节点号
NUM	MAXD，MIND	已定义的最大节点号
COUNT		选中集中的节点数
MXLOC	X、Y、Z	选中集中节点坐标最大的节点
MNLOC	X、Y、Z	选中集中节点坐标最小的节点

7.2 APDL 命令流应用详解

经前文介绍，读者应已对 APDL 语言基础知识有一定了解。本节将结合实例，为读者演示 ANSYS 参数化设计语言在实际中的使用，加深读者的理解，也方便在后文讲解 APDL 与 GUI 的综合应用。

7.2.1 模型的建立

本节将从最基础的模型建立开始，讲解 APDL 语言的应用。

本例将为读者介绍一个工字梁模型的建立过程。本例的大型工字梁高 1m，宽 0.5m，翼板厚 0.1m，腹板厚 0.1m，梁长 3m，梁腹板正中有高分别为 0.5m 与 1m 的圆角方孔，圆角半径 0.1m。

本例完成建模后，将对其上表面施加 1kN 的竖向载荷，两端固定。

本例是自底向上建模，即从点开始，最后发展成为体。

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。

在 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 中输入工作目录名称，在 Job Name 输入项目名称 7-1。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

2）在 GUI 界面的命令输入框中运行如下命令。

```
/prep7                          !/prep7 命令用于进入前处理器
k，1，，0.5，0                   !命令 K 用于定义关键点
k，2，，0.5，0.25                !命令 K 的使用方法为 K，NPT，X，Y，Z
k，3，，0.4，0.25                !NPT 为关键点号
k，4，，0.4，0.05                !X、Y、Z 为关键点坐标
k，5，，-0.4，0.05
k，6，，-0.4，0.25
k，7，，-0.5，0.25
k，8，，-0.5，0
```

用户可以直接在命令输入框中输入，也可以复制粘贴到输入框，按〈Enter〉键运行，运行结果应如图 7-15 所示。

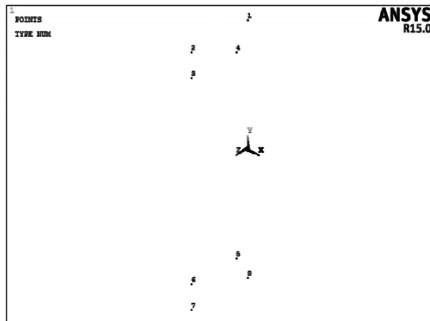


图 7-15　生成关键点

在 GUI 界面中的如下命令是用于定义关键点的。

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS；
Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>On Working Plane。

3）完成关键点定义后将它们连成面，运行如下命令。

```
a，1，2，3，4，5，6，7，8      !命令 A 用于将点围成面
                                !命令 A 最多可连接 18 个点
```

完成连接后的面应如图 7-16 所示。

4）生成截面后，再将其拉伸成梁，运行如下命令。

```
vext，all,,，3，0，0
```

完成拉伸应如图 7-17 所示。

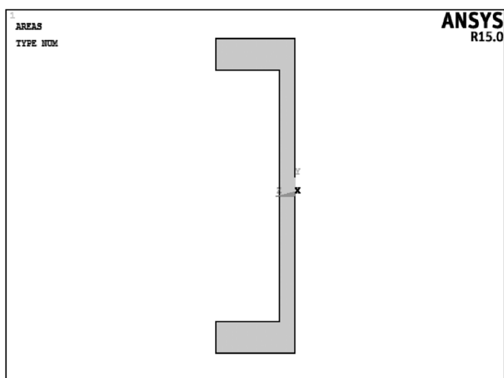


图 7-16　围成面

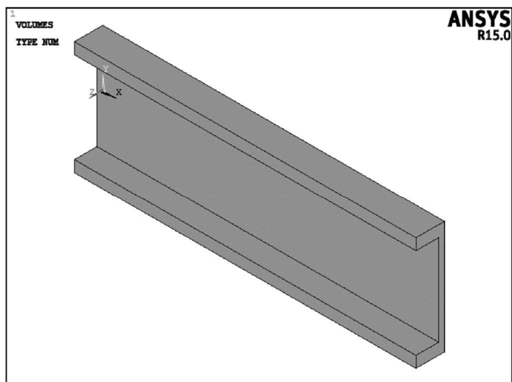


图 7-17　拉伸

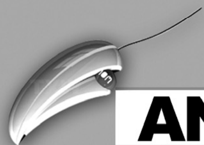
5）一半梁的基本形状完成后，在腹板上打孔。首先要绘制出孔的形状，运行如下命令。

```
k,，2，0.25          !定义方孔角点
k,，2，-0.25
k,，1，-0.25
k,，1，0.25
l，17，18            !L 命令将关键点连为矩形
l，18，19
l，19，20
l，20，17
```

在 GUI 界面工作区中应生成如图 7-18 所示的线框。

6）继续运行如下命令，将矩形倒圆角。

```
lfillt，28，25，0.1
lfillt，25，26，0.1
lfillt，26，27，0.1
lfillt，27，28，0.1
```



生成的圆角如图 7-19 所示。

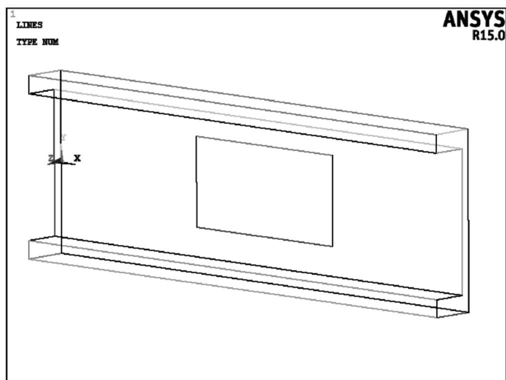


图 7-18　方孔基本形状

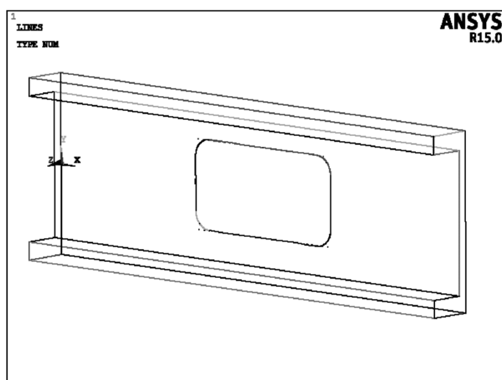


图 7-19　倒圆角

7）倒好圆角后再将 25、30、26、31、27、32、28、29 号线围成面，运行如下命令，生成图 7-20 所示的面。

al，25，30，26，31，27，32，28，29

将上一步生成的面拉伸成体，如图 7-21 所示。

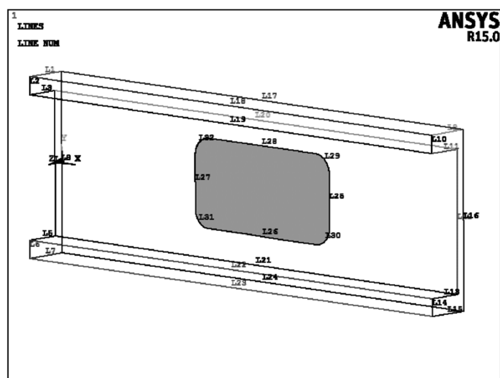


图 7-20　生成面

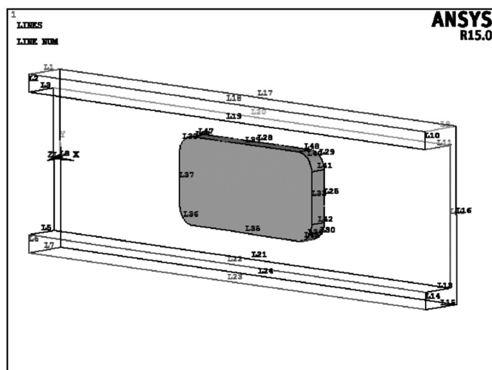


图 7-21　拉伸成体

8）接下来将梁本体减去孔的形状即可，运行如下命令，生成如下带孔的一半的梁。如图 7-22 所示。

```
vsbv，1，2
```

完成空腹梁的基本形状后，将其沿 Z 方向也即以 XY 平面为对称面进行镜像操作，运行如下命令。

```
vsymm，z，all
vadd，all
```

至此，模型的建立已经完成，如图 7-23 所示。

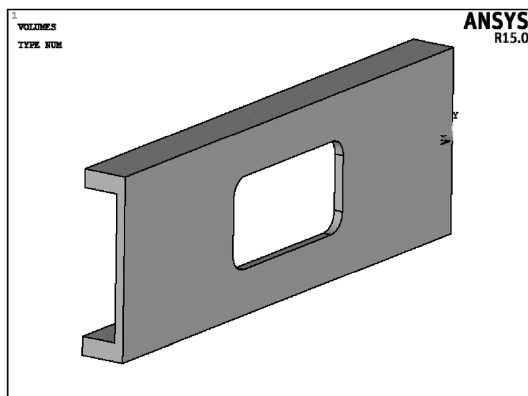


图 7-22　两体相减

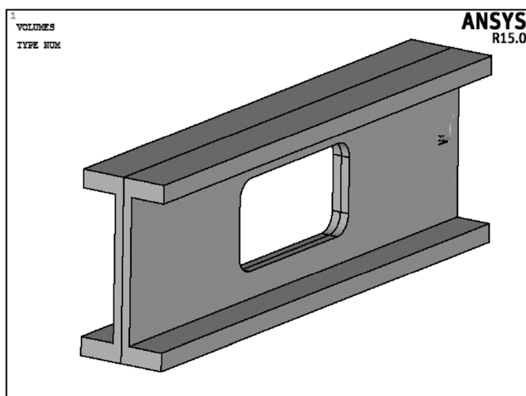


图 7-23　完成建模

7.2.2 网格划分

按照一般分析思路，完成建模后即进行材料定义与网格划分。请读者参考 6.2.1 模型的建立一节，建立如图 7-24 所示的工字梁模型。

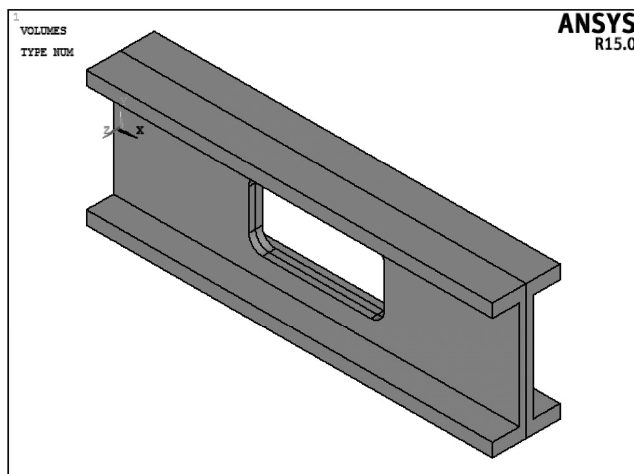


图 7-24　生成模型

运行如下命令，进行单元与材料的定义。

```
et，1，92                      !定义单元 1 为 92 号单元
mp，ex，1，2e11                !定义材料 1 为线弹性材料，指定弹性模量
mp，prxy，1，0.3               !定义材料 1 为各向同性材料，指定泊松比
```

习惯上，这一部分应该在命令流的开始即完成定义，然后进行建模操作。

完成单元与材料参数的设定后，运行如下命令。

```
esize，0.1，0                  !单元边长
mshape，1，3d                  !使用四面体单元
```

```
mshkey，0                                        !使用自由网格划分
vmesh，all                                       !划分单元
```

此时即完成单元划分。划分网格的结果如图 7-25 所示。

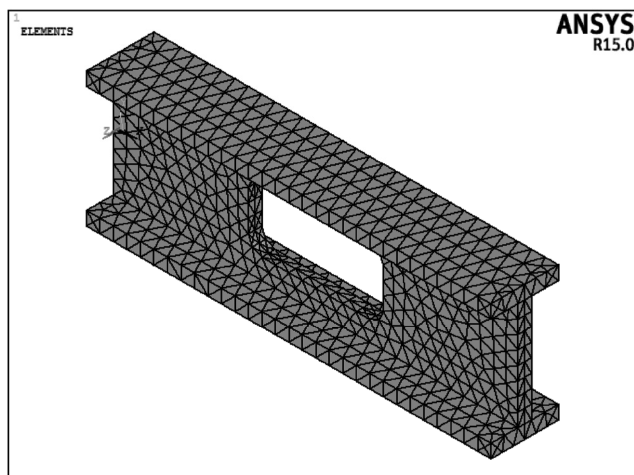


图 7-25　完成单元划分

7.2.3 边界条件

完成单元划分后即可以对模型进行加载处理。请读者参考 6.2.1 模型的建立与 6.2.2 网格划分两节，建立模型并完成单元划分，得到有限元模型。

运行如下命令，选出梁端面的节点。

```
nsel，s，loc，x，0                                  !选中 X=0 与 X=3 的节点
nsel，a，loc，x，3
```

选出的节点应如图 7-26 所示。

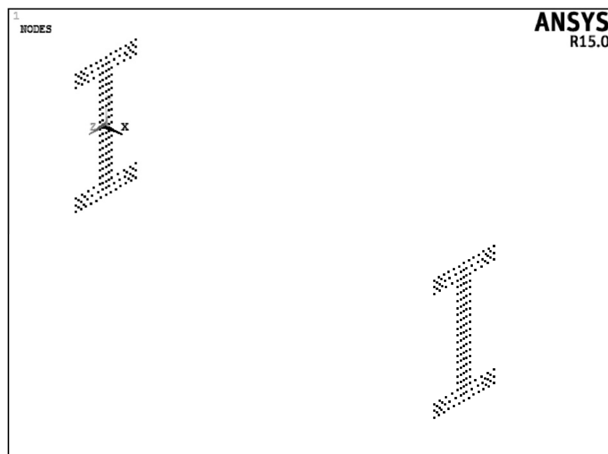


图 7-26　端面节点

所选出的节点即为施加边界条件的对象。运行如下命令，将选出节点的自由度进行约束。

```
d，all，all            !约束自由度
```

完成约束的节点应如图 7-27 所示，此时，完整模型如图 7-28 所示。

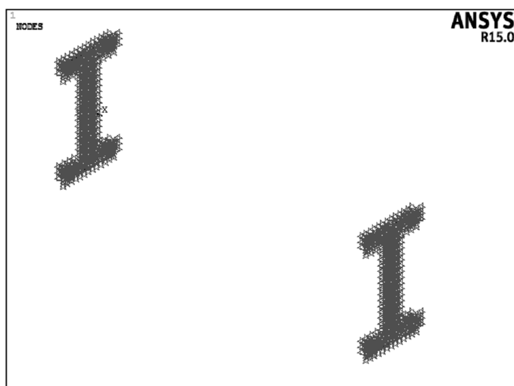


图 7-27　约束自由度

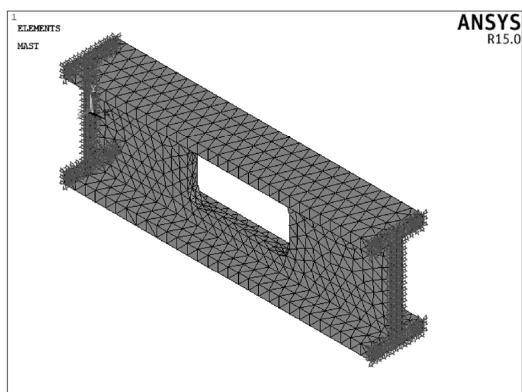


图 7-28　模型

完成约束后，将进行施加载荷操作。运行如下命令，选出施加载荷的节点。

```
nsel，s，loc，x，1.5                    !选中加载节点
nsel，r，loc，y，0.5
nsel，r，loc，z，0
```

选出的节点为上表面中央节点。继续运行如下命令。

```
f，all，fy，-1000                       !施加载荷
fini
```

完成加载的节点如图 7-29 所示，此时，完成边界条件设置的模型如图 7-30 所示。

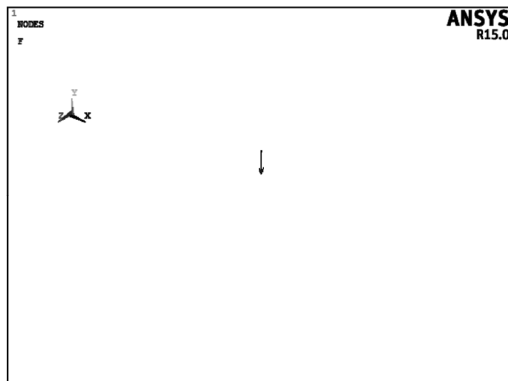


图 7-29　加载

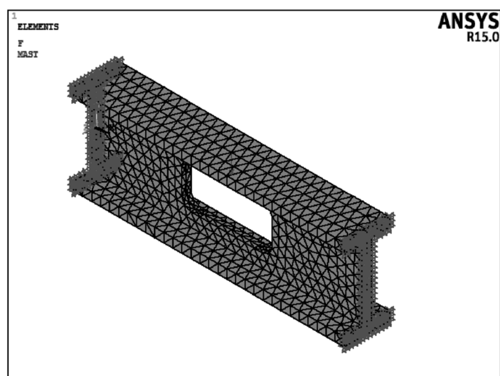


图 7-30　完成边界定义

7.2.4 求解

模型准备就绪即可求解，读者请参考前文介绍，自行完成建模、网格划分与边界设置的操作，得到可用于计算的模型。

运行如下命令：

```
/SOLU                                              !进入求解器求解
nsel，all
solve
fini
```

完成求解的结果如图 7-31 所示。

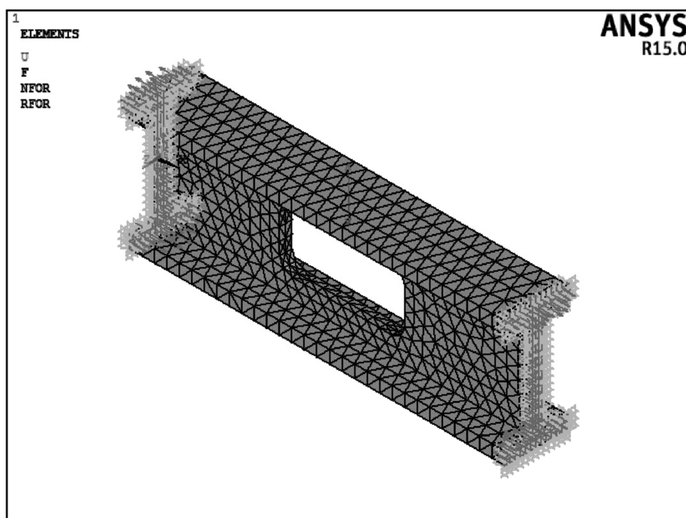


图 7-31　求解完成

此时已可在工作区中看到图形显示的计算结果。

7.3　本章小结

本章为读者介绍了 ANSYS 参数化设计语言 APDL（ANSYS Parametric Design Language，APDL）的基础知识。

APDL 语言是步入高阶用户的必经之路，熟悉 APDL 语言的用户方能具备处理复杂问题的能力。本章介绍了编写 APDL 命令流所需要的基本知识，讲解了使用 APDL 命令的方法。

读者可以参考本章示例，一步一步执行操作，观察命令运行的结果。有一定了解之后，开始自己动手编写命令流，分析自行编写的命令与本书所给示例的异同与优劣。初识 APDL 的用户可能会略觉得烦琐，但多读代码、多写代码后，一定可编写出比本书示例更为高效的分析程序。

第 2 篇

机械工程应用篇

本篇以实例为主导，为读者讲解 ANSYS 有限元分析在工程中的应用方法。本篇精选了多个工程实例，以实例为中心，带领读者逐步深入地理解 ANSYS 有限元分析的方法与思想，在工程实例中学习有限元分析的技术与方法，在实战中提高分析问题的能力。

在本篇中，循序渐进，由浅入深地向读者展现如何从无到有地建立实际问题的模型，如何选择 ANSYS 的不同功能与分析方法以应对不同的分析对象，以及如何综合使用 APDL 命令流与 GUI 操作以达到最高效率的运用。

第 8 章列举实例讲解机械行业的典型实例和机械行业中实际分析方法，并讲解如何在实际问题中将复杂问题简化为可分析计算的实用模型。

第 9 章讲解机械行业中的重要问题，即各种热加工过程的分析方法，结合实例为用户分析如何进行热力学分析、耦合场分析的方法。

第 10 章为装配与复合材料的分析，结合装配实例讲解非线性的、复杂多体的模型的分析方法。

第 11 章着重讲解 LS-DYNA 的使用方法，详细讲解显式动态分析这一重要的分析方法，并结合实例进行演练。

第 12 章为机械工程综合实例，全面展示如何灵活、综合性地运用多种分析方法来解决实际工程问题。

第 8 章　机械结构基础分析

结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。结构这个术语是一个广义的概念，它包括土木工程结构（如桥梁和建筑物）、汽车结构（如车身骨架）、海洋结构（如船舶结构）、航空结构（如飞机机身），还包括机械零部件（如活塞、传动轴）等。简单来说，在一台机械设备中，可以发生相对运动的称为机构，不能发生相对运动的称为结构。

8.1　基础知识

静力分析是计算在固定不变载荷作用下结构的响应，它不考虑惯性和阻尼影响，如结构受随时间变化的载荷作用情况。静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷（如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风载和地震载荷）的作用。

静力分析用于计算由那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定，即假定载荷和结构响应随时间的变化非常缓慢。静力分析所施加的载荷包括外部施加的作用力和压力、稳态的惯性力（如重力和离心力）、强迫位移、温度载荷（对于温度应变）、能流（对于核能膨胀）等。

下面仅对结构静力学方法作详细介绍。

结构静力学分析的基本流程可以分为 3 个阶段：建模、加载与求解、结果分析。

（1）建模

首先用户应指定作业名和分析标题，然后通过/PREP7 前处理程序定义单元类型、实常数、材料特性、模型的几何元素。这些步骤是大多数分析类型共同的。

在进行静力分析时，要注意如下事项。

- 可以采用线性或非线性结构单元。
- 材料特性可以是线性或非线性，各向同性或正交各向异性，常数或与温度相关的。
- 必须按某种形式定义刚度（如弹性模量 EX，超弹性系数等）。
- 对于惯性载荷（如重力等），必须定义质量计算所需的数据，如密度 DENS。
- 对于温度载荷，必须定义热膨胀系数 ALPX。
- 对于网格密度，应力或应变急剧变化的区域（通常是用户感兴趣的区域），需要比应力或应变近乎常数的区域较密的网格；在考虑非线性的影响时，要用足够的网格来得到非线性效应。如塑性分析需要相当的积分点密度，因而在高塑性变形梯度区需要较密的网格。

（2）加载与求解

完成模型的建立后即可以开始加载。结构静力学分析中可以使用的载荷有如下几种。

- 位移（UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ）。这些自由度约束常施加到模型边界上，用以定义刚性支承点。它们也可以用于指定对称边界条件以及已知运动的点。由标号指定的方向是按照节点坐标系定义的。
- 力（FX、FY、FZ）和力矩（MX、MY、MZ）。这些集中力通常在模型的外边界上指定。其方向是按节点坐标系定义的。
- 压力（PRES）。这是表面载荷，通常作用于模型的外部。正压力为指向单元面（起到压缩的效果）。
- 温度（TEMP）。温度用于研究热膨胀或热收缩（即温度应力）。如果要计算热应变的话，必须定义热膨胀系数。用户可以从热分析（LDREAD）中读入温度，或者直接指定温度（通过 BF 族命令）。
- 流（FLUE）。用于研究膨胀（由于中子流或其他原因而引起的材料膨胀）或蠕变的效应。只在输入膨胀或蠕变方程时才能使用。
- 重力、旋转等。整个结构的惯性载荷。如果要计算惯性效应，必须定义密度（或某种形式的质量）。

除了与模型无关的惯性载荷以外，用户可以在模型的几何实体（关键点、线、面）或在有限元模型（节点和单元）上定义载荷。

完成加载后即可以求解。

（3）结果分析

静力分析结果保存于结构分析结果文件（Jobname.RST）中，包括以下内容：

- 基本解。节点位移（UX、UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ）。
- 导出解。节点和单元应力、节点和单元应变、单元力、节点反力等。

典型的后处理操作有如几种。

- 显示变形图。应用 PLDISP 命令（MainMenu>GeneralPostproc>PlotResults>DeformedShape）来显示变形图。PLDISP 命令的 KUND 参数给用户可以在原始图上迭加变形图。
- 列出反力和反力矩。通过 PRESOL 命令（MainMenu>GeneralPostproc>ListResults>ReactionSolu）列出约束节点的反力和力矩。
- 列出节点力和力矩。执行 PRESOL、F（或 M）命令（MainMenu>GeneralPostproc>ListResults>ElementSolution）列出节点力和力矩。也可以列出所选择的节点集的所有节点的力和力矩。首先选择节点集，然后列出作用于这些节点上的所有力。

APDL 命令：FSUM。

GUI 界面操作：MainMenu>GeneralPostproc>NodalCalcs>TotalForceSum。

用户也可以在每个已选择的节点上检查所有力和力矩。对于处于平衡状态的实体，除载荷作用点和存在反力的节点以外的所有节点上，其总载荷为 0。

APDL 命令：NFORCE。

GUI 界面操作：MainMenu>GeneralPostproc>NodalCalcs> Sum@EachNode。

- 线单元结果。对于线单元（如梁、杆、管），通过 ETABLE（MainMenu>

GeneralPostproc>ElementTable> DefineTable）来取得导出数据（如应力、应变等）。结果数据用一个标号和一个序列号的组合，或用元件名来区分。

- 误差评估。在实体和壳单元的线性静力分析中，通过 PRERR 命令（MainMenu>GeneralPostproc> ListResults>PercentError）列出网格离散误差的评估值。这个命令按结构能量模（SEPC）计算和列出误差百分比，代表一个特定的网格离散的相对误差。
- 结构能量误差评估。通过 PLESOL、SERR 命令来计算单元之间的结构能量误差（SERR）。在等值线图中，SERR 较大的区域是要进行网格细化的候选区域。
- 等值线显示。可通过 PLNSOL 和 PLESOL 命令（Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot > Nodal Solu or Element Solu）显示几乎所有结果项的等值线、如应力（SX、SY、SZ 等）、应变（EPELX、EPELY、EPELZ 等）和位移（UX、UY、UZ 等）。PLNSOL 和 PLESOL 命令的 KUND 域使用户可以在原始结构上迭加显示。

通过 PLETAB 和 PLLS 命令（Main Menu> General Postproc> Element Table> Plot Element Table 和 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot Line Elem Res）来显示单元表数据和线单元数据。导出数据，如应力、应变，在应用 PLNSOL 命令时为节点上的平均值。这种平均的结果对于不同材料、不同厚度的壳或其他不连续体时，会得出错误的结果。为了避免这一问题，应当用选择命令来选择相同材料、相同厚度的壳等，然后才能应用 PLNSOL 命令。另一个方法是应用 PowerGraphics 及 AVRES 命令以使在不同材料、不同厚度的壳上不产生平均应力。

- 矢量显示。通过 PLVECT 命令（Main Menu> General Postproc> Plot Results> Vector Plot Predefined）来观察矢量的显示，通过 PRVECT 命令（Main Menu> General Postproc> List Results> Vector Data）来观察矢量列表。对于观察矢量如位移（DISP）、转角（ROT）、主应力（S1，S2，S3），矢量显示（不要与矢量模态混淆）是一种有效的办法。
- 表格列示。通过下列命令来进行表格列示。

APDL 命令：PRNSOL（节点结果）、PRESOL（单元单元之间结果）、PRRSOL（反力）等。

GUI 界面操作：Main Menu> General Postproc> List Results> solution option。

在列表前，通过 NSORT 和 ESORT 命令（Main Menu> General Postproc> List Results> Sorted Listing Sort Nodes or Sort Elems）进行数据排序。

8.2 螺栓强度分析

螺栓是由头部和螺杆（带有外螺纹的圆柱体）两部分组成的一类紧固件，需与螺母配合，用于紧固连接两个带有通孔的零件。这种连接形式称螺栓联接。如把螺母从螺栓上旋下，又可以使这两个零件分开，故螺栓联接是属于可拆卸联接。

本节将为读者介绍一个强度等级 4.8 的 M16×40 外六角螺栓在轴向载荷 10kN 的作用下的应力分析。

8.2.1 建立模型

1）选择 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。设置参数、工作目录、工作名称，单击 Run 按钮进入 ANSYS 15.0 GUI 界面。

2）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preferences 命令，弹出图 8-1 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框，勾选 Structural，单击 OK 按钮。

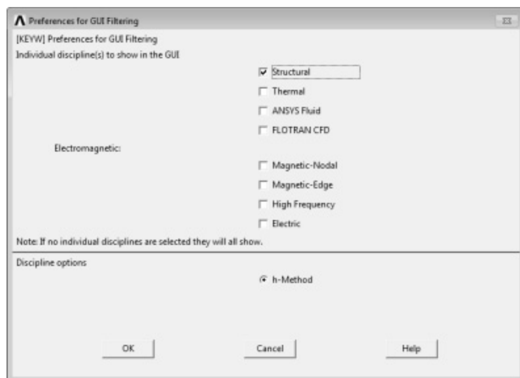


图 8-1　Preferences for GUI Filtering 对话框

3）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cylindrica 命令，将全局坐标修改为柱坐标。

4）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，弹出图 8-2 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

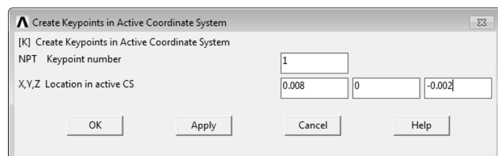


图 8-2　Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

在 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框输入关键点编号与坐标，如图 8-2 所示，单击 Apply 按钮，继续输入坐标，直至完成表 8-1 所示的所有关键点的设置。

表 8-1　关键点坐标

关 键 点 号	X	Y	Z
1	0.008	0	-0.002
2	0.008	90	-0.0015
3	0.008	180	-0.001
4	0.008	270	-0.0005
5	0.008	0	0

完成输入的关键点如图 8-3 所示。

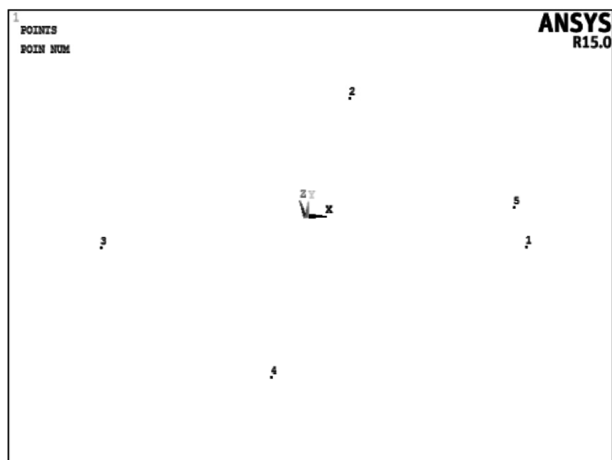


图 8-3　定义关键点

5）完成点的定义后，将之连成线。在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>In Active Coord 命令，依次拾取工作区中的点 1、2，单击 Apply 按钮，连接 1、2 号关键点。继续完成 2、3 号关键点，3、4 号关键点，4、5 号关键点的连接，结果如图 8-4 所示。

6）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Lines 命令，单击 Pick All 按钮，弹出如图 8-5 所示的 Copy Lines 对话框。

设置复制份数为 7，偏移量为 DY=0.002。单击 OK 按钮完成复制，完成复制的线如图 8-6 所示。

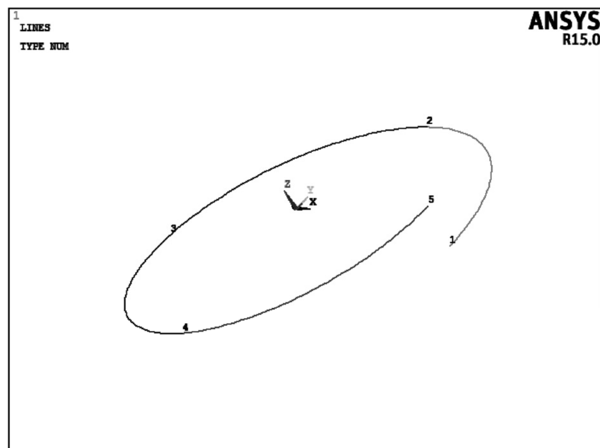


图 8-4　连接直线

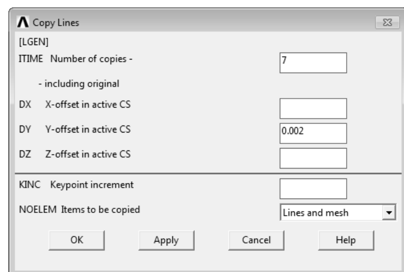


图 8-5　Copy Lines 对话框

7）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Merge Items 命令，弹出图 8-7 所示的 Merge Coincident of Equivalently Defined Items 对话框，设置合并项如图 8-7 所示，单击 OK 按钮完成编号压缩。

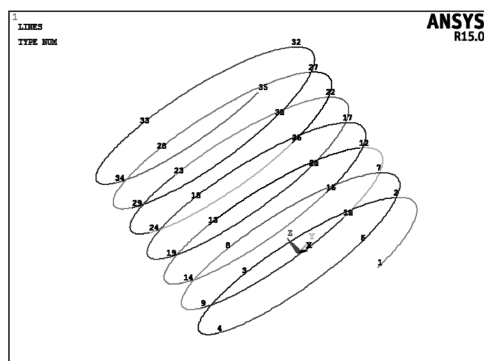


图 8-6 完成线的复制

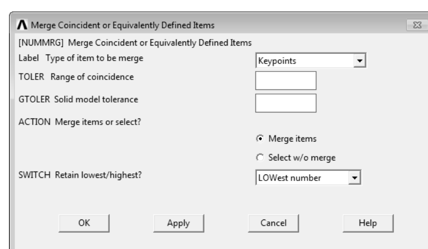


图 8-7 Merge Coincident of Equivalently Defined Items 对话框

8）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Add>Lines 命令，单击 Pick All 按钮，将所有线相加。

9）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

在 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框定义 80~83 号关键点，坐标位置列于表 8-2 中，完成定义关键点如图 8-8 所示。

表 8-2 关键点列表

关键点号	X	Y	Z
80	0.008+0.0015/4	90	0.012+0.002/4
81	0.008+2*0.0015/4	180	0.012+2*0.002/4
82	0.008+3*0.0015/4	270	0.012+3*0.002/4
83	0.008+4*0.0015/4	0	0.012+4*0.002/4

10）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>In Active Coord 命令，依次拾取工作区中的点 35、80，单击 Apply 按钮，继续拾取，依次将 80 与 81、81 与 82、82 与 83 按顺序连接，连接完成的线如图 8-9 所示。

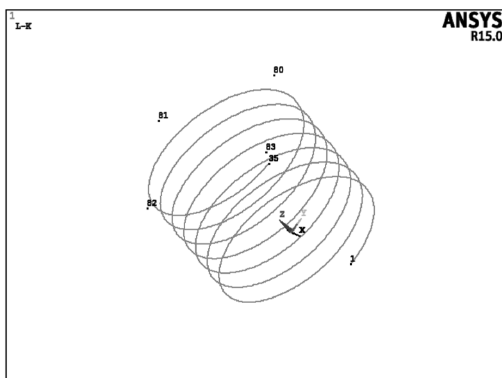


图 8-8 定义关键点

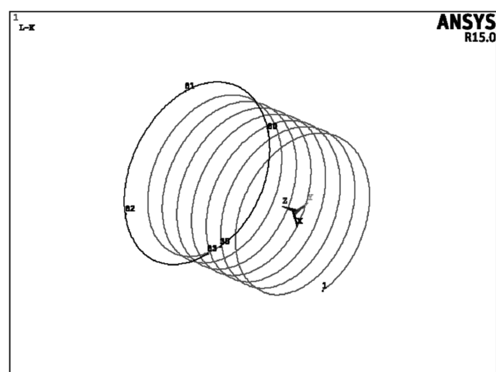


图 8-9 连线

11）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Cartesian 命令，将全局坐标系设置为笛卡儿坐标系。

12）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

在 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框定义 90~92 号关键点，坐标位置列于表 8-3 中，完成定义关键点如图 8-10 所示。

表 8-3　关键点坐标

关 键 点 号	X	Y	Z
90	0.008	0	−0.00025
91	0.006918	0	−0.002
92	0.006918	0	0

13）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line 命令，拾取点 1、90，单击 Apply 按钮，再拾取点 91、92，将上述点连接成直线。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>At angle to line 命令，拾取工作区中的 7 号线，单击 OK 按钮，拾取 90 号关键点，单击 OK 按钮，输入旋转角度为 60。

复上述操作，旋转对象为 7 号线，旋转点为 1 号点，旋转角度为 120。截面轮廓如图 8-11 所示。

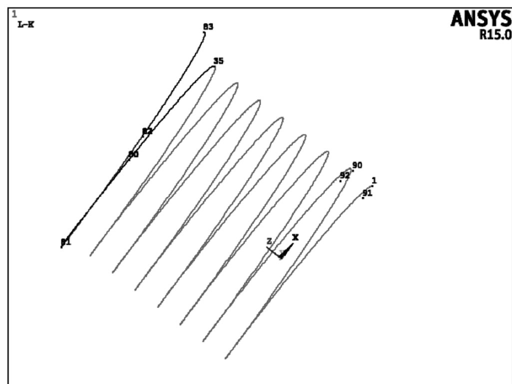


图 8-10　螺纹截面关键点

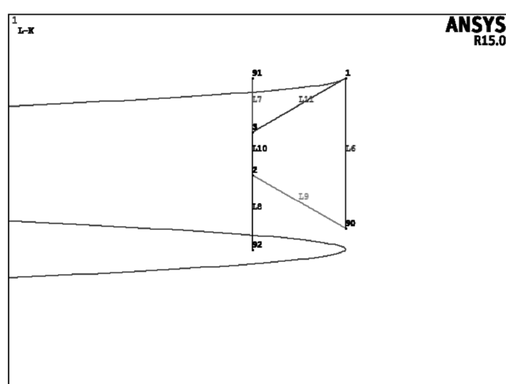


图 8-11　螺纹截面轮廓

14）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines 命令，拾取工作区中的 6、9、10、11 号线，单击 OK 按钮，完成截面定义如图 8-12 所示。

15）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas> Along Lines 命令，拾取螺纹截面，单击 OK 按钮，再拾取所有螺旋线，单击 OK 按钮，完成螺纹槽的定义如图 8-13 所示。

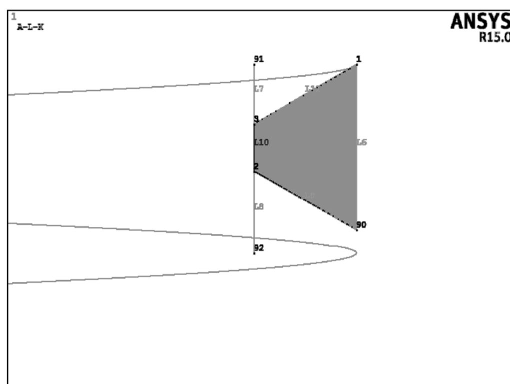


图 8-12 螺纹截面



图 8-13 螺纹槽

16）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cylinder>By Dimensions 命令，弹出图 8-14 所示的 Create Cylinder by Dimensions 对话框，输入圆柱参数如图 8-14 所示。

单击 OK 按钮生成螺栓体如图 8-15 所示。

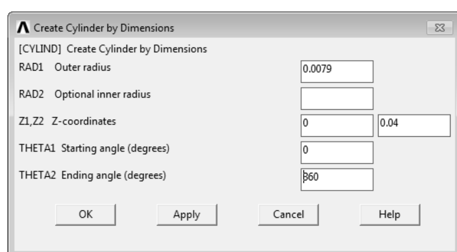


图 8-14 Create Cylinder by Dimensions 对话框

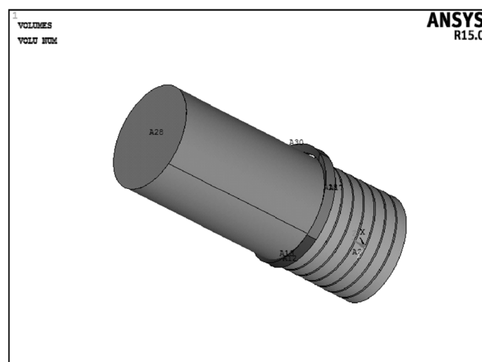


图 8-15 生成螺栓体

17）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中设置选择对象为 Volumes，选择方式为 Unselect，单击 OK 按钮，拾取上一步生成的螺栓体，单击 OK 按钮。

18）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component 命令，弹出图 8-16 所示的 Create Component 对话框。

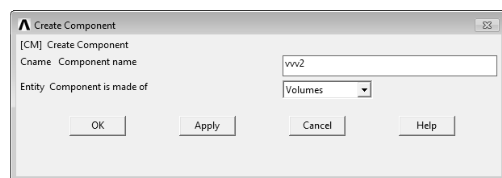


图 8-16 Create Component 对话框

输入组件名称，设置组合的对象为 Volumes，单击 OK 按钮。

19）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract> Volumes 命令，拾取螺栓体，单击 OK 按钮，然后在拾取框中输入 vvv2，单击 OK 按钮，完成相减操作，如图 8-17 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，弹出 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

在 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框定义 93~96 号关键点，坐标位置列于表 8-4 关键点列表中，完成定义关键点如图 8-18 所示。

表 8-4　关键点列表

关 键 点 号	X	Y	Z
93	0.0065	0	0
94	0.0095	0	0.003
95	0	0	0
96	0	0	0.03

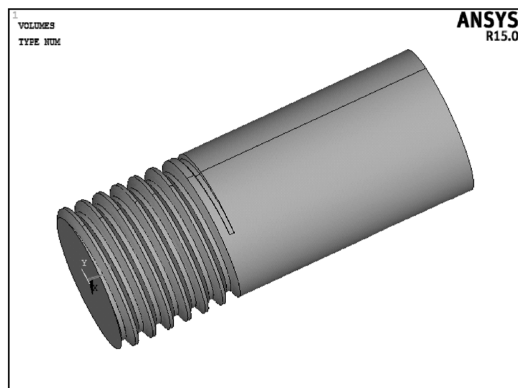


图 8-17　生成螺纹

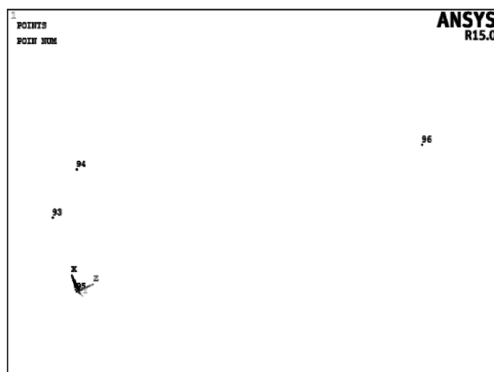


图 8-18　93~96 号关键点

20）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line 命令，拾取 93、94 号关键点，连接成为直线，如图 8-19 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>About Axis 命令，拾取 93、94 号关键点连接线，单击 OK 按钮，单击 95、96 号关键点，单击 OK 按钮。生成的曲面如图 8-20 所示。

21）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中设置选择对象为 Areas，选择方式为 From Full Set，单击 OK 按钮，拾取上一步生成的倒角面，单击 OK 按钮。此时工作区中的面如图 8-21 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide>Volume by Area 命令，输入体号 7，单击 OK 按钮，然后单击 Pick All 按钮，完成倒角分割。

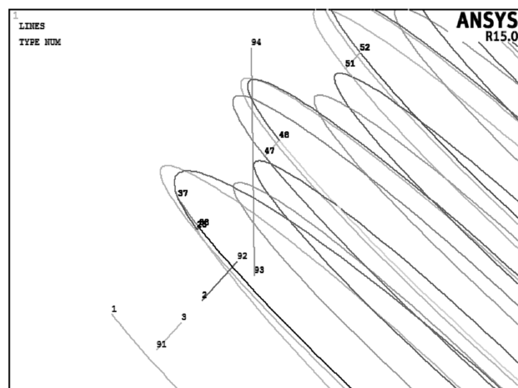


图 8-19 连线

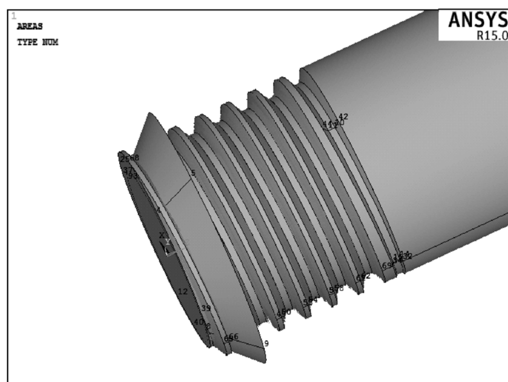


图 8-20 旋转曲面

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Everything 命令，然后在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Delete>Volume and Below 命令，拾取应删去的倒角部分，单击 OK 按钮，完成倒角如图 8-22 所示。

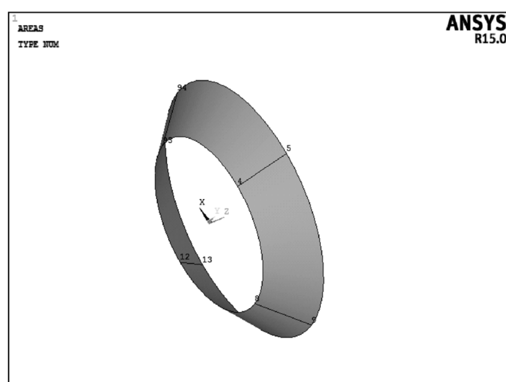


图 8-21 选择中倒角面

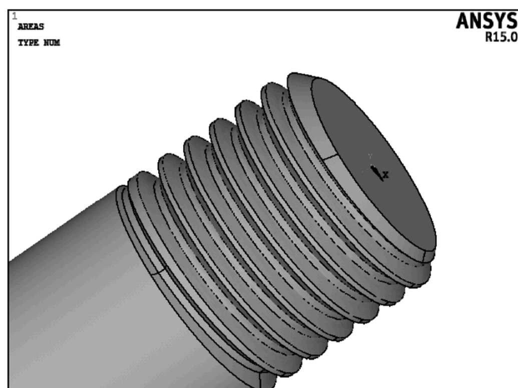


图 8-22 倒角

22）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Prism>By Inscribed Rad 命令，弹出图 8-23 所示的 Prism by Inscribed Radius 对话框，输入参数如图 8-23 所示。

单击 OK 按钮生成六角螺栓头如图 8-24 所示。

23）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cone>By Dimensions 命令，弹出图 8-25 所示的 Create Cone by Dimesions 对话框，输入参数如图 8-25 所示。

单击 OK 按钮，生成螺栓头的倒圆如图 8-26 所示。

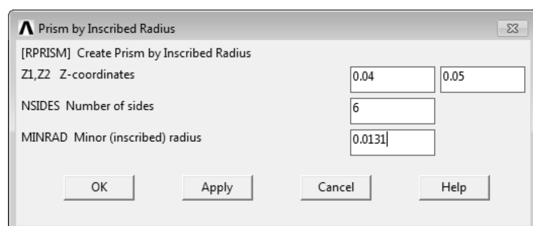


图 8-23　Prism by Inscribed Radius 对话框

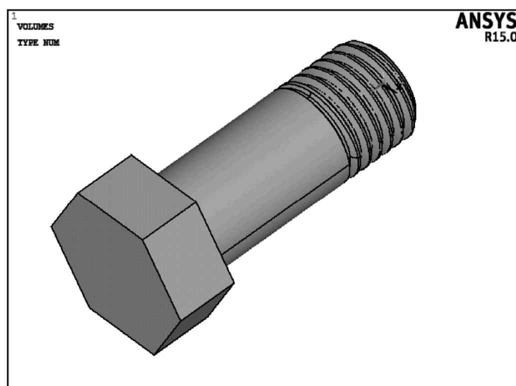


图 8-24　生成螺栓头

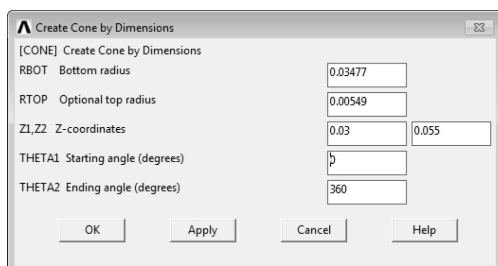


图 8-25　Create Cone by Dimesions 对话框

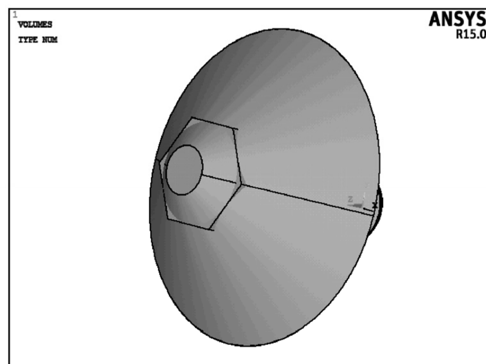


图 8-26　倒圆面

24）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Intersect> Common>Volumes 命令，先拾取六角螺栓头，单击 OK 按钮，再拾取倒圆面，单击 OK 按钮，完成螺栓头的倒圆角如图 8-27 所示。

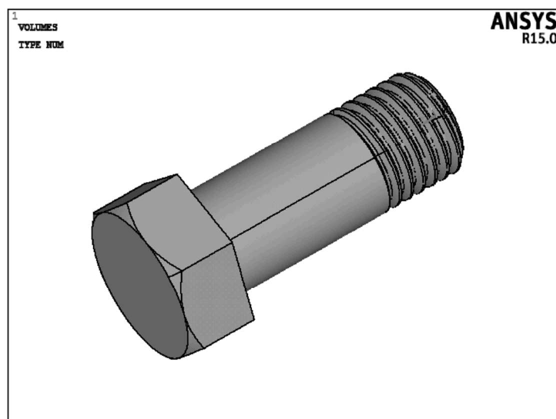


图 8-27　倒圆角

至此完成螺栓模型的建立。

8.2.2 定义单元与材料

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete 命令，弹出图 8-28 所示的 Element Types 对话框。

单击 Add 按钮，弹出图 8-29 所示的 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 对话框中选择单元类型为 SOLID186，单击 OK 按钮。

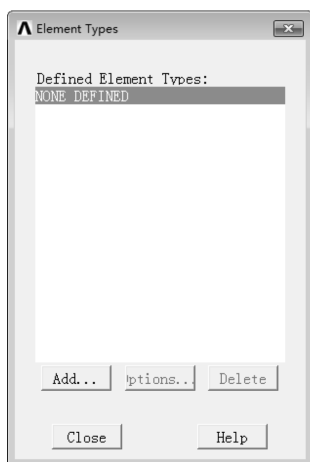


图 8-28 Element Types 对话框

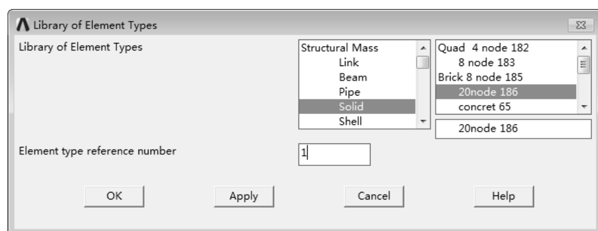


图 8-29 Library of Element Types 对话框

此时回到 Element Types 对话框中即可看到添加完成的单元，如图 8-30 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models 命令，弹出图 8-31 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为结构、线性、弹性、各向同性，弹出图 8-32 所示的对话框。



图 8-30 Element Types 对话框

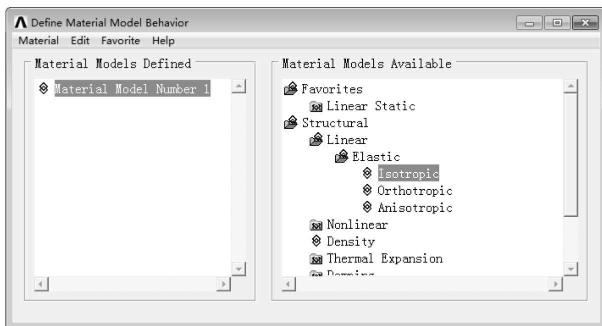


图 8-31 Define Material Model Behavior 对话框

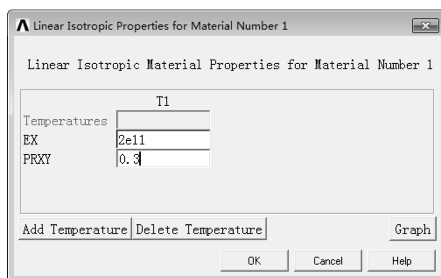


图 8-32　各向同性线弹性材料参数

输入 EX=2e11，PRXY=0.3，即设置弹性模量为 200E9Pa，泊松比 0.3，单击 OK 按钮确定。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool 命令，弹出图 8-33 所示的 Mesh Tool 网格划分工具。

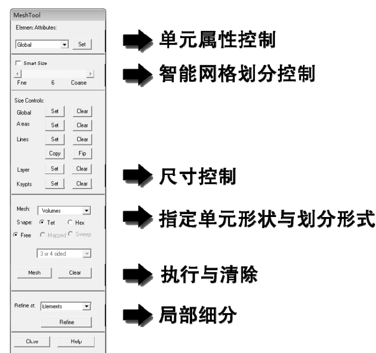


图 8-33　Mesh Tool 网格划分工具

选择智能网格划分，设置划分精度为 6，单击 Mesh 按钮，弹出拾取框后单击 Pick All 按钮，即完成单元划分，如图 8-34 所示，螺纹处的网格细节如图 8-35 所示。

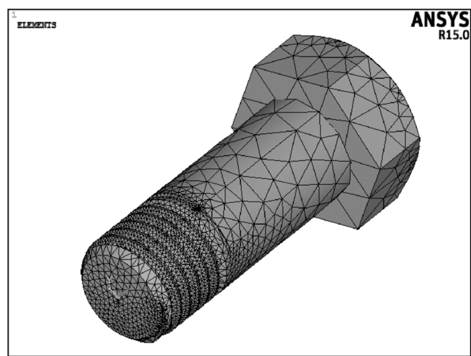


图 8-34　划分网格

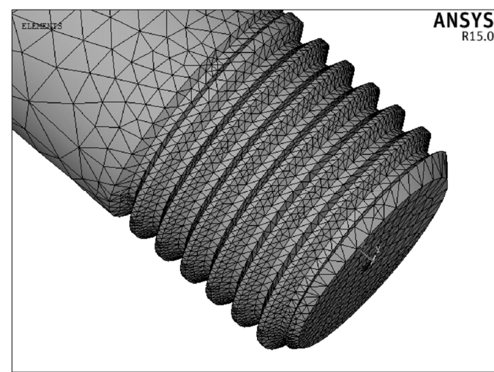


图 8-35　螺纹处网格细节

8.2.3 定义边界条件

完成材料网格划分后，即可以进行定义边界。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas 命令，拾取螺栓下面如图 8-36 所示，单击 OK 按钮，弹出图 8-37 所示的 Apply U，ROT on Areas 对话框。

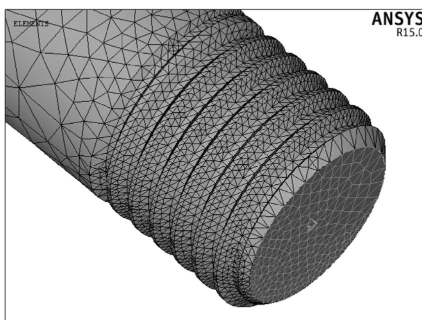


图 8-36　将约束的面

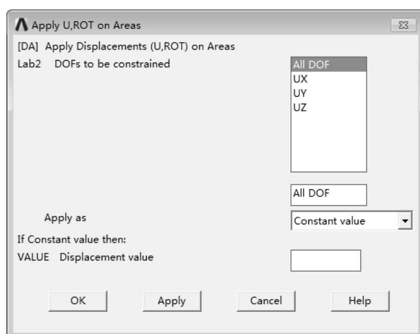


图 8-37　Apply U，ROT on Areas 对话框

在 Apply U，ROT on Areas 对话框中选择 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束如图 8-38 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Areas 命令，弹出拾取框后拾取图 8-39 所示的面。

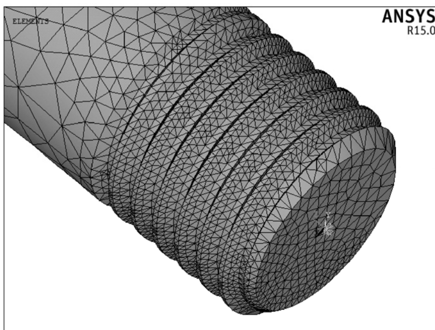


图 8-38　完成约束

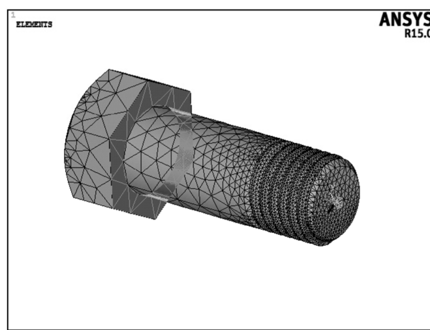


图 8-39　施力面

选中施加载荷面后，单击 OK 按钮，弹出图 8-40 所示的 Apply PRES on areas 对话框，输入载荷值为 3.36E7，单击 OK 按钮，完成边界如图 8-41 所示。

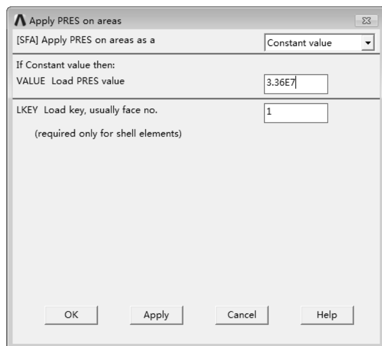


图 8-40　Apply PRES on areas 对话框

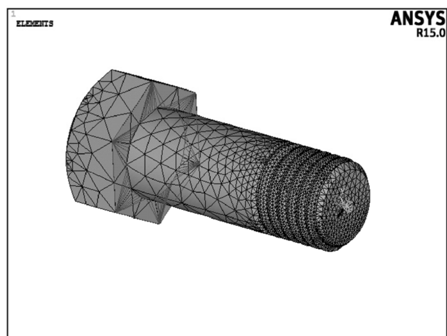
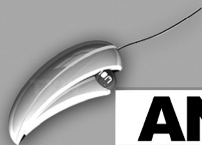


图 8-41　施加载荷



8.2.4 求解与后处理

完成了建模、划分网格、施加边界条件，此时已经完成了计算前的准备工作，下一步即可以进行求解。

在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 8-42 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 8-43 所示的图 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

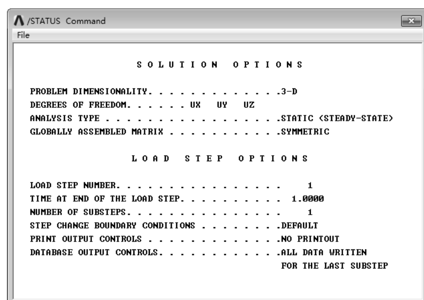


图 8-42 STATUS Command 窗口

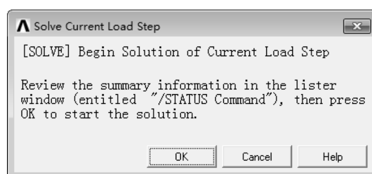


图 8-43 Solve Current Load Step 对话框

单击图 8-43 所示的 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出图 8-44 所示的 Solution is done!提示时，求解完成。

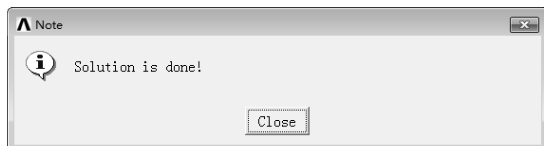


图 8-44 Solution is done!

完成求解后即可在后处理器中看到求解结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results>Deformed Shape…命令，弹出图 8-45 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在图 8-45 所示的 Plot Deformed Shape 对话框中选择 Def+udef edge 选项，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示如图 8-46 所示的变形图。

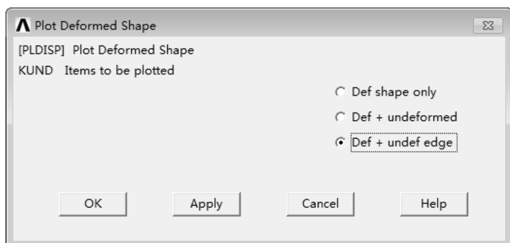


图 8-45 Plot Deformed Shape 对话框

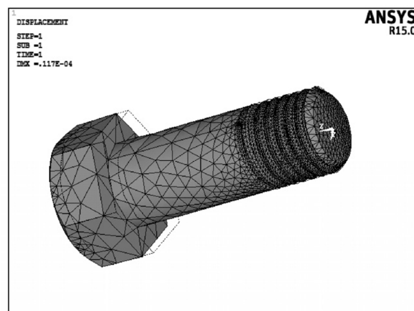


图 8-46 变形图

在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 命令，弹出图 8-47 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 8-48 所示。

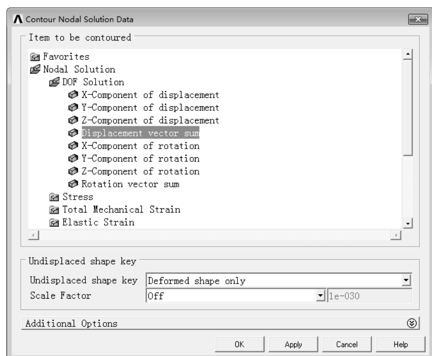


图 8-47 Contour Nodal Solution Data 对话框

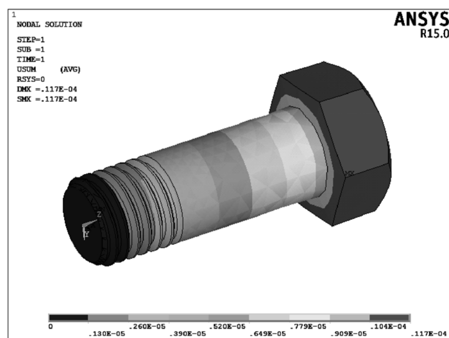


图 8-48 显示位移

同样的方法显示项目的节点解如图 8-49～图 8-52 所示。

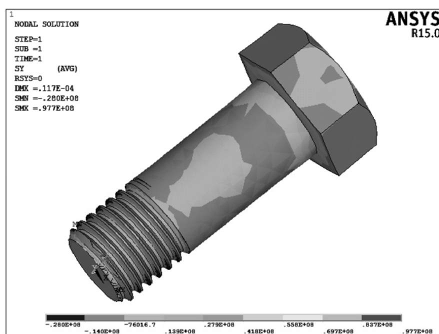


图 8-49 Y 方向应力云图

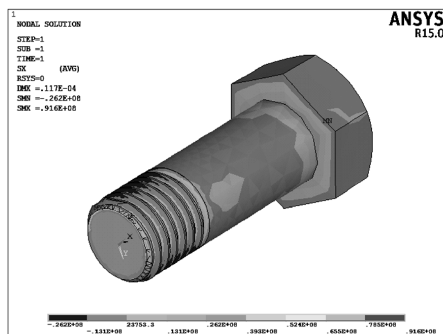


图 8-50 X 方向应力云图

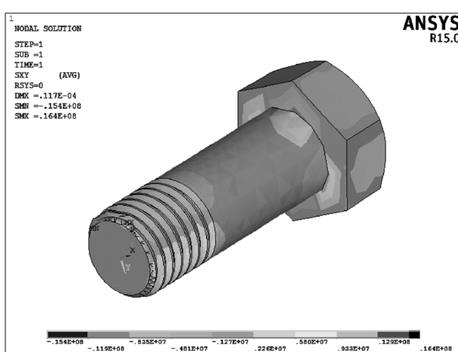


图 8-51 XY 剪应力云图

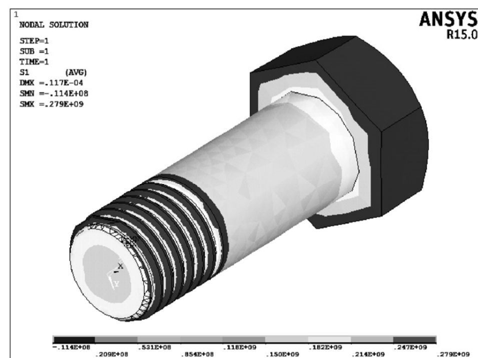


图 8-52 第一主应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Element Solu，选择单元解的项目，显示单元解结果如图 8-53～图 8-56 所示。

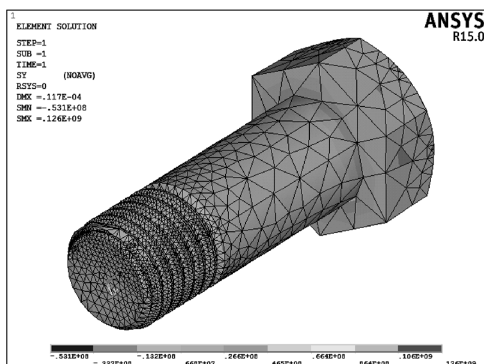


图 8-53　Y 方向单元应力

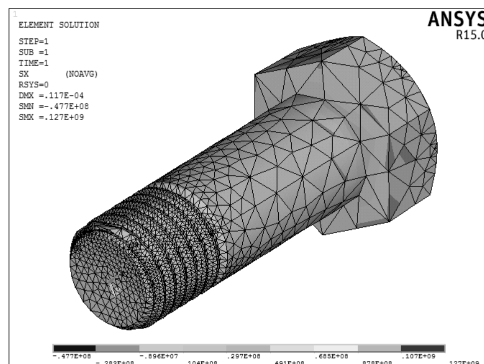


图 8-54　X 方向单元应力

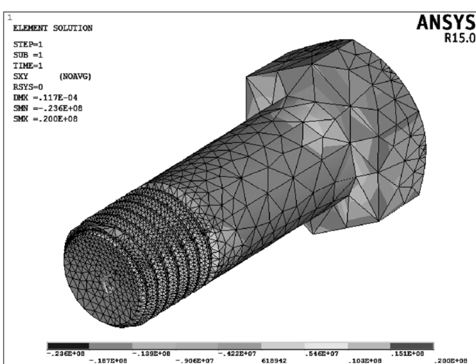


图 8-55　XY 单元剪应力

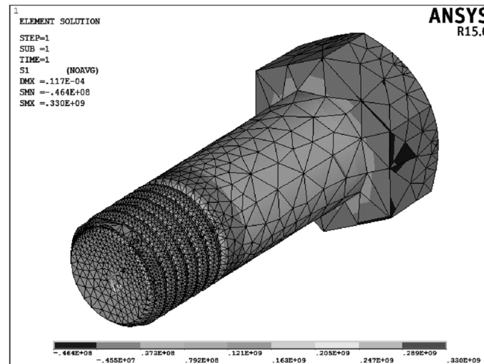


图 8-56　单元第一主应力

在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Vector Plot>Predefined 命令，弹出图 8-57 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

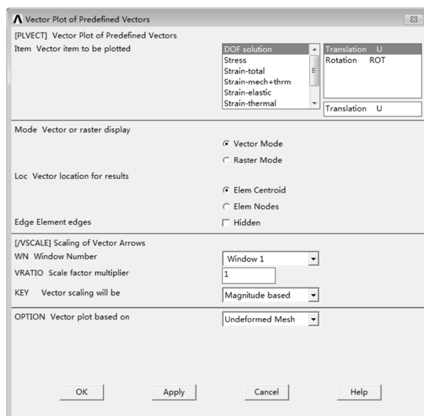


图 8-57　Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮则显示图 8-58 所示的平移矢量，选择显示的矢量为 Principal S，单击 OK 按钮则显示图 8-59 所示的主应力矢量。

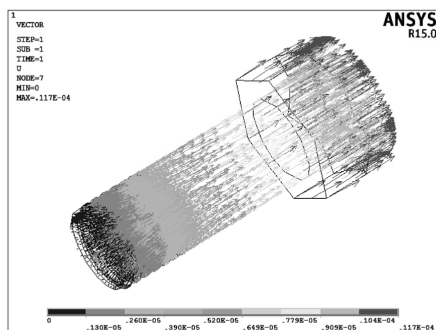


图 8-58 平移矢量

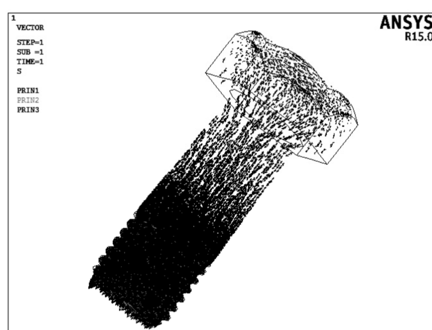


图 8-59 主应力矢量

8.3 起重机结构分析

本例为一空间桁架结构的静力分析，在进行静力分析的同时练习直接建立有限元模型的方法。

8.3.1 问题描述

如图 8-60 所示货物起重机，由两个桁架结构组成，它们通过交叉支承结合在一起。每个桁架结构的两个主要构件是箱型钢梁（横截面是箱型的）。每个桁架结构通过内部支承来加固，内部支承焊接在方框钢梁上。连接两个桁架的交叉支承销接在桁架结构上（这种连接不能传递弯矩，因此认为是铰支点）。起重机的端部 A、B、C 和 D 牢固地焊接在巨大的结构上。几何尺寸如图 8-61 所示。

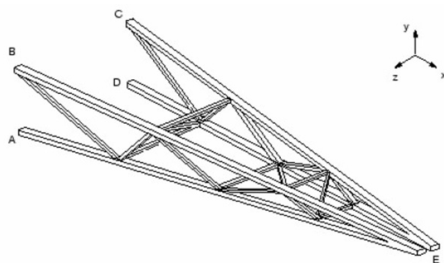


图 8-60 起重机

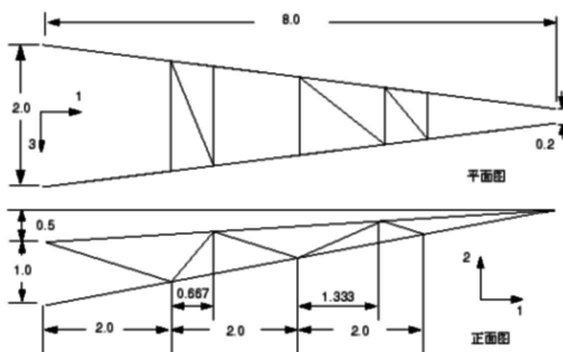


图 8-61 几何尺寸

该结构中所有梁都是箱形截面。截面尺寸图 8-62 和图 8-63 所示。

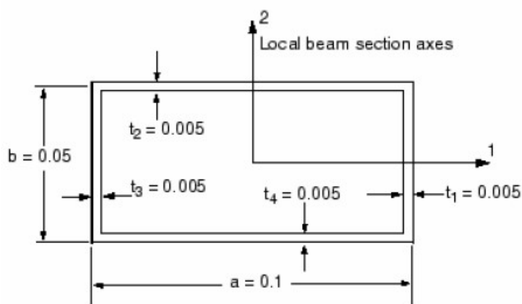


图 8-62　桁架结构主要构件梁截面

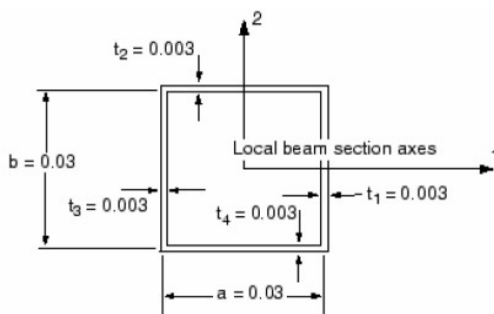


图 8-63　内部支承及交叉支承梁截面

所有构件材料都是中强度钢，E = 200E9 Pa，μ= 0.25，G=80E9。

求当它在端部承受 10kN 沿 y 轴负方向的载荷时，起重机固定端反力，E 处挠度，并求出受力最危险部位。

8.3.2 设置分析环境

启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。设置参数、工作目录、工作名称，单击 Run 按钮进入 ANSYS 15.0 GUI 界面。

在主菜单元中选择 Preferences 命令，弹出图 8-64 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框。

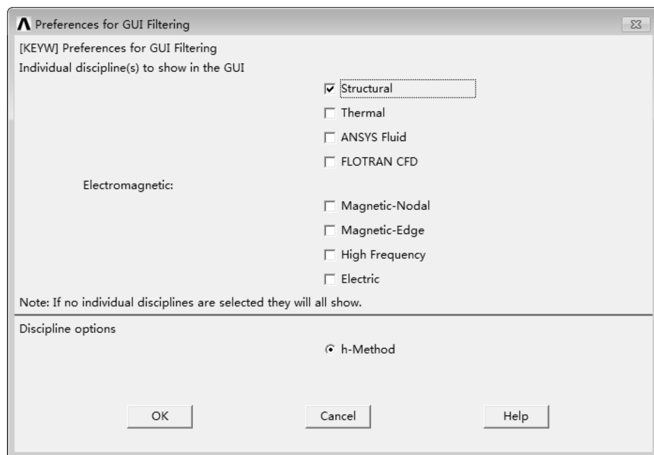


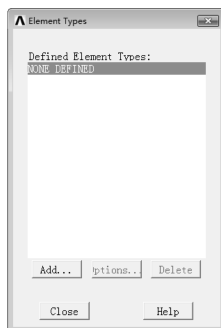
图 8-64　Preferences for GUI Filtering 对话框

选择分析类型为 Structural，单击 OK 按钮，完成分析环境设置。

8.3.3 定义单元与材料属性

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete 命令，弹出图 8-65 所示的 Element Types 对话框。

单击 Add 按钮，弹出图 8-66 所示的 Library of Element Types 对话框。选择单元类型为 LINK180，单击 OK 按钮。



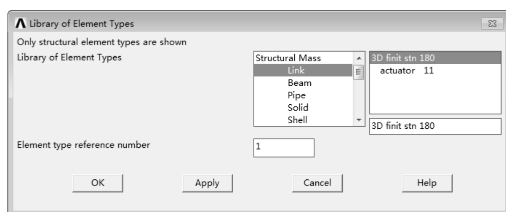


图 8-65　Element Types 对话框　　　　图 8-66　Library of Element Types 对话框

此时回到 Element Types 对话框中即可看到添加完成的单元。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models 命令，弹出图 8-67 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为结构、线性、弹性、各向异性，弹出图 8-68 所示的对话框。

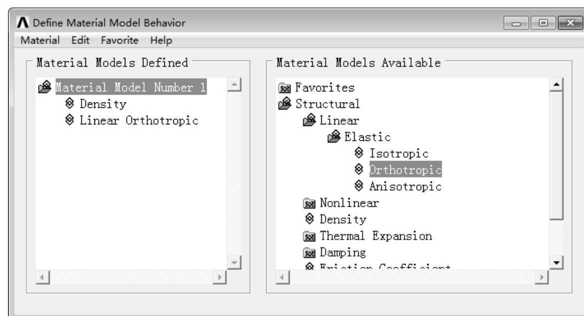
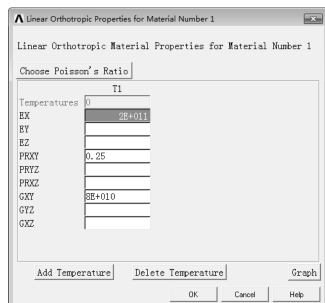


图 8-67　Define Material Model Behavior 对话框

输入 EX=2E11，PRXY=0.25，GXY=2E10，即设置弹性模量为 200E9Pa，泊松比 0.25，剪切模量为 80E9MPa，单击 OK 按钮确定。

回到图 8-67 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择结构、密度，弹出图 8-69 所示的 Density for Material Number 1 对话框。



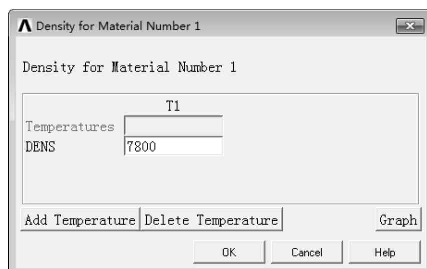


图 8-68　各向异性线弹性材料参数　　　　图 8-69　Density for Material Number 1 对话框

输入材料密度 7800，并单击 OK 按钮完成，关闭 Define Material Model Behavior 对话框。

接下来定义杆的截面特性。

在 GUI 界面选择 Main Menu> Preprocessor> Real Constants> Add/Edit/Delete 命令，弹出图 8-70 所示的 Real Constants 对话框。

单击 Add 按钮，弹出图 8-71 所示的 Element Type for Real Constants 对话框。在单元类型列表中选择 LINK180，即先前定义的单元类型，单击 OK 按钮，弹出图 8-72 所示的 Real Constant Set Number 1 for LINK180 对话框。



图 8-70　Real Constants 对话框



图 8-71　Element Type for Real Constants 对话框

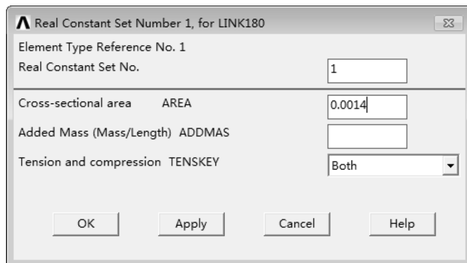


图 8-72　Real Constant Set Number 1，for LINK180

输入实常号 1，截面积 0.0014，单击 Apply 按钮完成，继续弹出图 8-72 所示的 Real Constant Set Number 1，for LINK180 对话框，设置常数编号 2，截面积 0.0011，单击 OK 按钮完成，此时 Real Constants 对话框中列出了已定义的两个不同的实常数。

至此完成单元及材料属性的定义。

8.3.4 建立有限元模型

根据此模型的特点，可以直接建立有限元模型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Nodes> In Active CS 命令，弹出图 8-73 所示的 Create Nodes in Active Coordinate System 对话框。

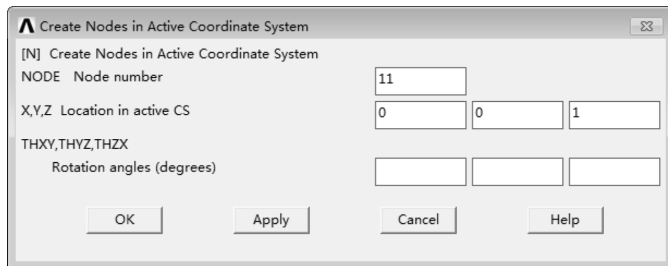


图 8-73　Create Nodes in Active Coordinate System 对话框

输入第一个节点号 11 以及节点 11 的坐标如图 8-73 所示。单击 Apply 按钮，继续输入节点号及坐标，直至完成表 8-5 所示的所有节点。

表 8-5　节点列表

节　点　号	X	Y	Z
11	0	0	1
12	2	3/8	0.1+0.9/4*3
13	4	6/8	0.1+0.9/4*2
14	6	9/8	0.1+0.9/4
15	8	12/8	0.1
16	16/3	8/6	0.4
17	8/3	7/6	0.7
18	0	1	1
21	0	0	-1
22	2	3/8	-(0.1+0.9/4*3)
23	4	6/8	-(0.1+0.9/4*2)
24	6	9/8	-(0.1+0.9/4)
25	8	12/8	-0.1
26	16/3	8/6	-0.4
27	8/3	7/6	-0.7
28	0	1	-1

或者在命令输入框中运行如下命令。

```
n，11，0，0，1
n，12，2，3/8，0.1+0.9/4*3
n，13，4，6/8，0.1+0.9/4*2
n，14，6，9/8，0.1+0.9/4
n，15，8，12/8，0.1
n，16，16/3，8/6，0.4
n，17，8/3，7/6，0.7
n，18，0，1，1
n，21，0，0，-1
n，22，2，3/8，-(0.1+0.9/4*3)
n，23，4，6/8，-(0.1+0.9/4*2)
n，24，6，9/8，-(0.1+0.9/4)
n，25，8，12/8，-0.1
n，26，16/3，8/6，-0.4
n，27，8/3，7/6，-0.7
n，28，0，1，-1
```

生成的节点如图 8-74 节点侧视图及图 8-75 节点俯视图所示。

接下来将节点连接成为单元。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Elements>Elem

Attributes 命令，弹出图 8-76 所示的 Element Attributes 对话框。

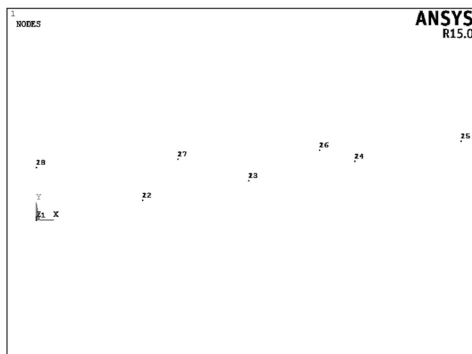


图 8-74　节点侧视图

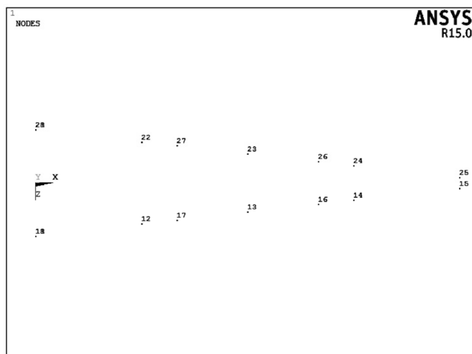


图 8-75　节点俯视图

设置参数如图 8-77 所示，单击 OK 按钮完成。在 GUI 界面选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Auto Numbered> Thru Nodes 命令，弹出图 8-77 所示的 Elements from Nodes 对话框。

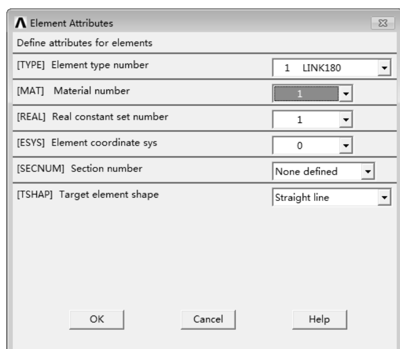


图 8-76　Element Attributes 对话框

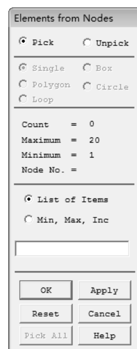


图 8-77　Elements from Nodes 对话框

将工作区中的 11 号节点与 12 号节点连接，单击 Apply 按钮，如图 8-78 所示。

继连接单元，按表 8-6 所示关系将节点连接为单元，结果应如图 8-76 所示。

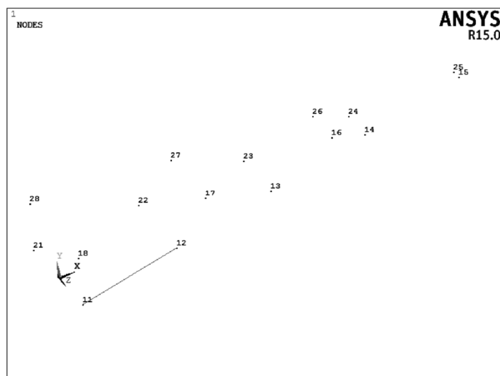


图 8-78　连接 11 节点与 12 节点

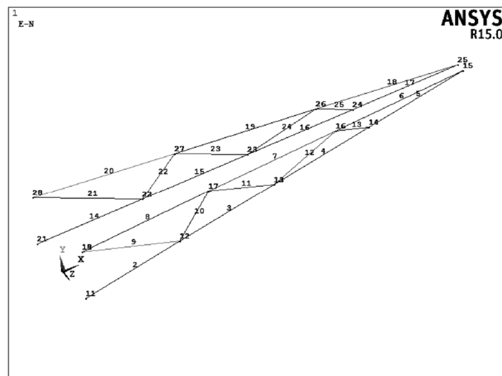


图 8-79　生成单元

表 8-6　连接单元

节点 1	节点 2
11	12
12	13
13	14
14	15
15	16
16	17
17	18
18	12
12	17
17	13
13	16
16	14
21	22
22	23
23	24
24	25
25	26
26	27
27	28
28	22
22	27
27	23
23	26
26	24

或者在命令输入框中运行如下命令。

e，11，12$e，12，13$e，13，14$e，14，15$e，15，16$e，16，17$e，17，18$e，18，12$e，12，17$e，17，13$e，13，16$e，16，14$e，21，22$e，22，23$e，23，24$e，24，25$e，25，26$e，26，27$e，27，28$e，28，22$e，22，27$e，27，23$e，23，26$e，26，24

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Elements>Elem Attributes 命令，弹出 Element Attributes 对话框。将实常数改为 2，如图 8-80 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Elements> Auto Numbered> Thru Nodes 命令，将表 8-7 所示的节点连接成为单元。连接完成的单元如图 8-81 所示。

表 8-7　内部结构单元节点

节点 1	节点 2
12	22
13	23
14	24

（续）

节点 1	节点 2
16	26
17	27
22	17
23	16
26	14

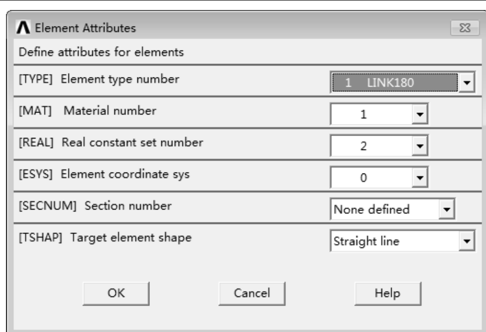


图 8-80　改实常为 2 号

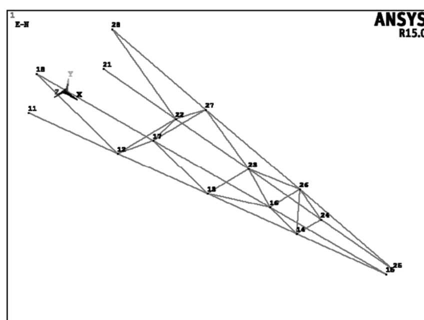


图 8-81　连接完成单元

上述操作也可以使用如下命令。

```
e，12，22
e，13，23
e，14，24
e，16，26
e，17，27
e，22，17
e，23，16
e，26，14
```

在命令输入框中输入/ESHAPE，1，运行，可以在工作区中显示单元的实际模型如图 8-82 所示。

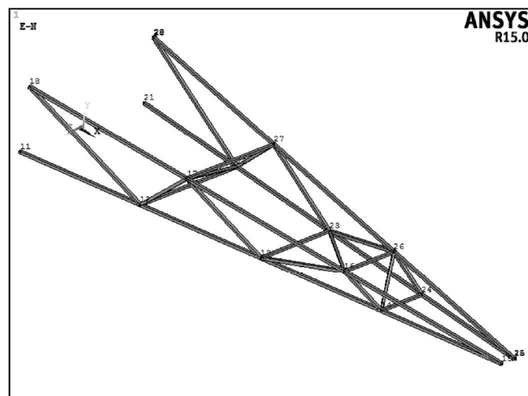


图 8-82　显示单元

至此已完成有限元模型的建立。

8.3.5 施加边界条件

由于本例建立的是有限元模型，直接生成了节点和单元，所以跳过划分网格，直接进入加载步骤。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Loads> Define Loads> Apply>Structural> Displacement> On Nodes 命令，弹出图 8-83 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。

在工作区中拾取 11、21、18、28 共 4 个节点，如图 8-84 所示，单击 OK 按钮，弹出图 8-85 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。

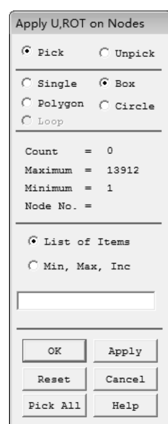


图 8-83 Apply U，ROT on Nodes 对话框

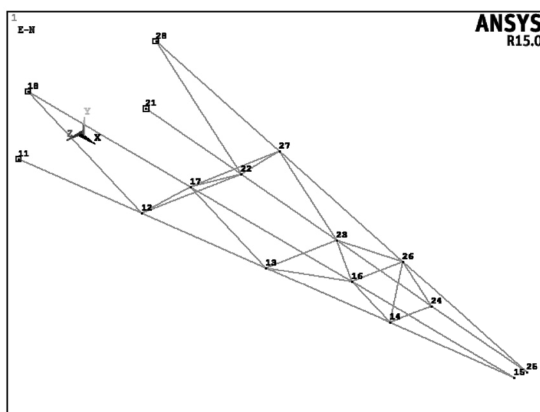


图 8-84 选中的节点

选择 All DOF，单击 OK 按钮，完成节点约束，如图 8-86 所示。

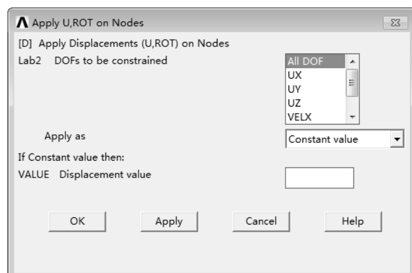


图 8-85 Apply U，ROT on Nodes 对话框

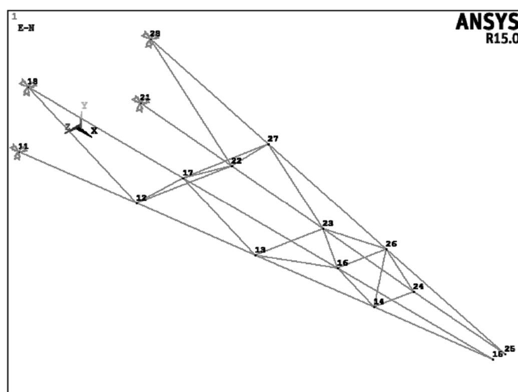


图 8-86 约束节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Force/Moment> On Nodes 命令，弹出图 8-87 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框。

在工作区中拾取节点 15，如图 8-88 所示，单击 OK 按钮，弹出图 8-89 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框。

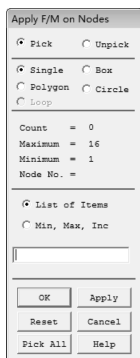


图 8-87　Apply F/M on Nodes 对话框 1

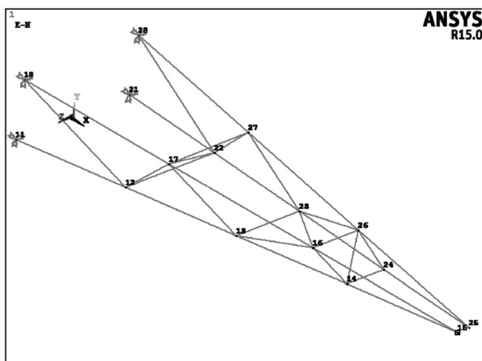


图 8-88　拾取施加载荷的节点

在图 8-89 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框中选择施加载荷的方向为 FY，加载方式为常量，大小为-10000，单击 OK 按钮完成加载，如图 8-90 所示。

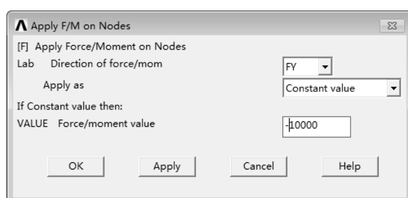


图 8-89　Apply F/M on Nodes 对话框 2

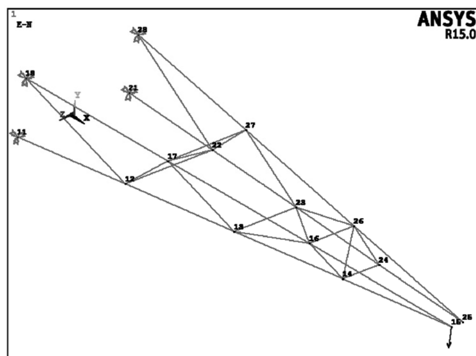


图 8-90　边界条件

接下来耦合节点自由度。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Coupling / Ceqn> Couple DOFs 命令，弹出 Define Coupled Dofs 对话框。

在工作区中选择节点 15 和节点 25，如图 8-91 所示，单击 OK 按钮，弹出图 8-92 所示的 Define Coupled DOFs 对话框。输入耦合节点集编号 1，选择要耦合的自由度为 ALL ，单击 OK 按钮，完成所有边界条件施加的模型，如图 8-93 所示。

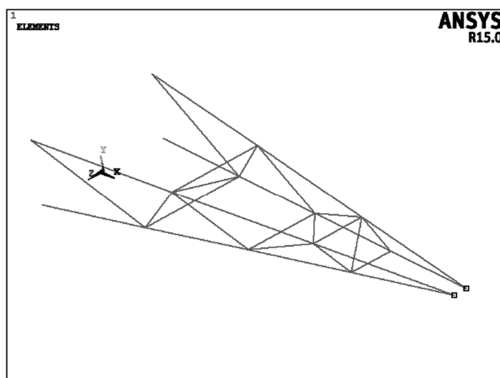


图 8-91　选择要耦合的节点

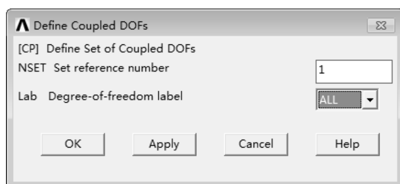


图 8-92 Define Coupled DOFs 对话框

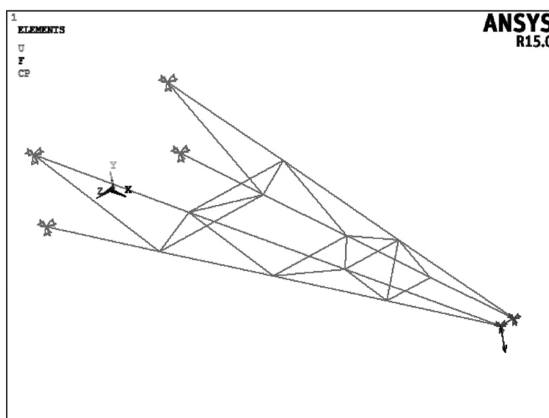


图 8-93 完整边界条件

至此完成边界条件的施加。

8.3.6 求解

完成了建模、施加边界条件后即表示已经完成了计算前的准备工作，下一步即可以进行求解。

在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 8-94 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 8-95 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。

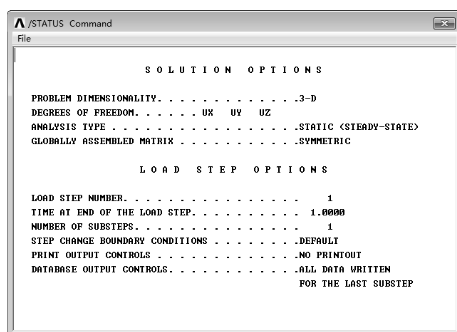


图 8-94 STATUS Command 窗口

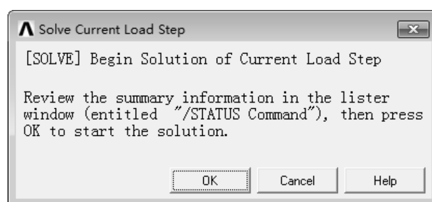


图 8-95 Solve Current Load Step 对话框

8.3.7 显示变形图

完成求解后用户即可进入通用后处理器进行处理分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results>Deformed Shape…命令，弹出图 8-96 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在图 8-96 所示的 Plot Deformed Shape 对话框中选择 Def+udef edge 选项，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示如图 8-97 所示的变形图。

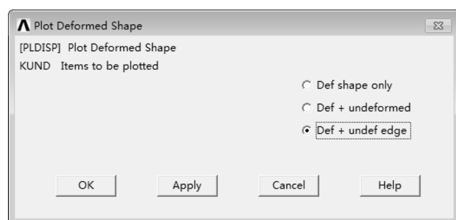


图 8-96 Plot Deformed Shape 对话框

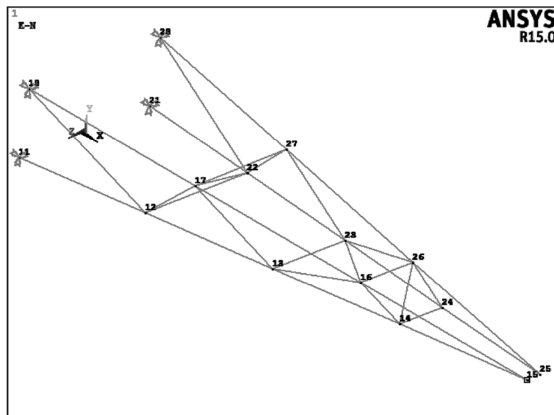


图 8-97 变形图

8.3.8 显示结果云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 8-98 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 8-99 所示。

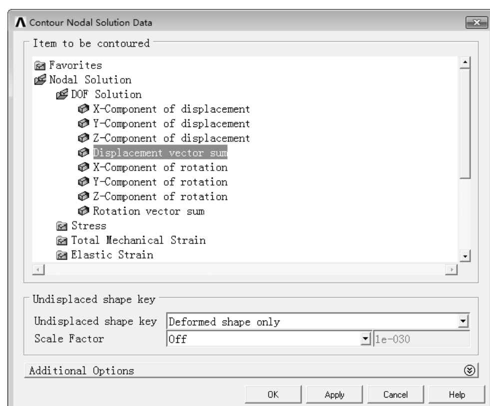


图 8-98 Contour Nodal Solution Data 对话框

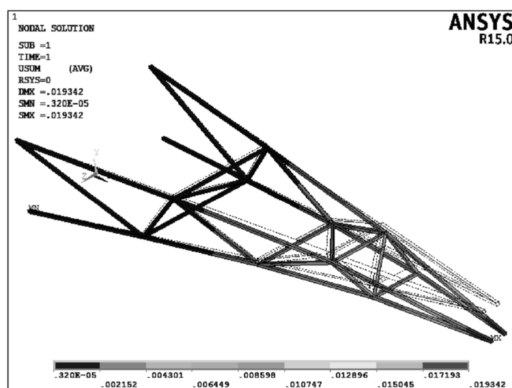


图 8-99 位移云图

8.3.9 查看矢量图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Vector Plot> Predefined 命令，弹出图 8-100 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮则显示图 8-101 所示的平移矢量。

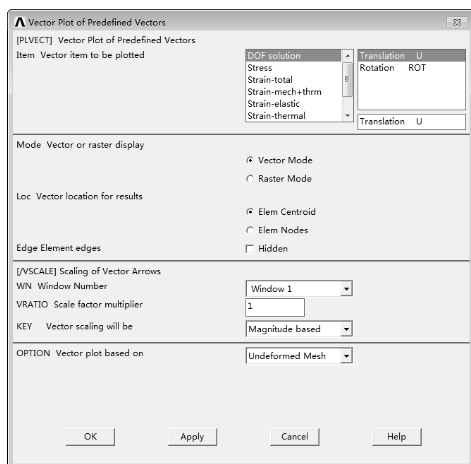


图 8-100 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

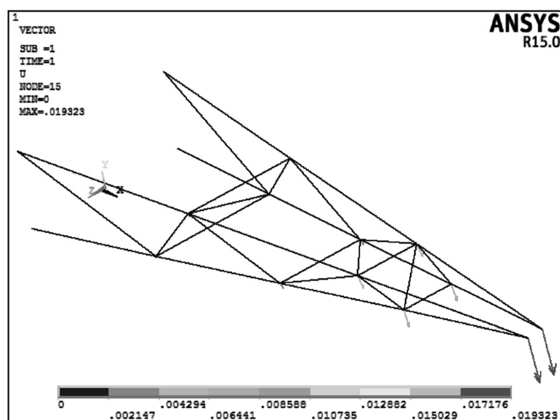


图 8-101 平移矢量

8.3.10 查看支座反力

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls> Symbols 命令，弹出图 8-102 所示的 Symbols 对话框。

在图 8-102 所示的 Symbols 设置对话框中选择 All Reactions，单击 OK 按钮。在 GUI 界面选择 Utility Menu> Plot> Elements 命令，工作区即可显示图 8-103 所示的约束节点反力。

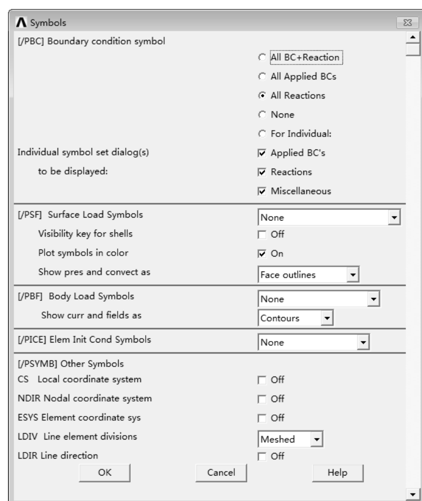


图 8-102 Symbols 对话框

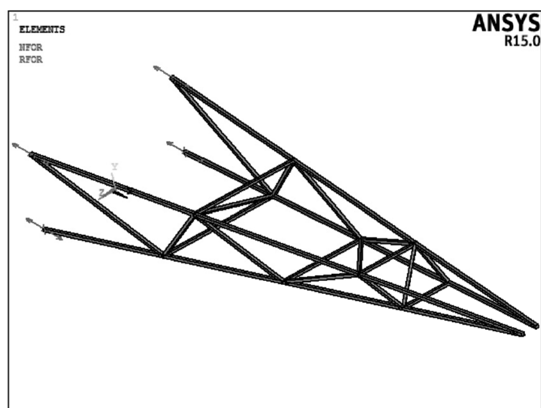


图 8-103 约束节点反力

8.3.11 查看轴力

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Element Solu，弹出图 8-104 所示的 Contour Element Solotion Data 对话框，选择单元解中的 Structural 项目下的轴力 X 方向分力，单击 OK 按钮，显示 X 方向分析如图 8-105 所示。

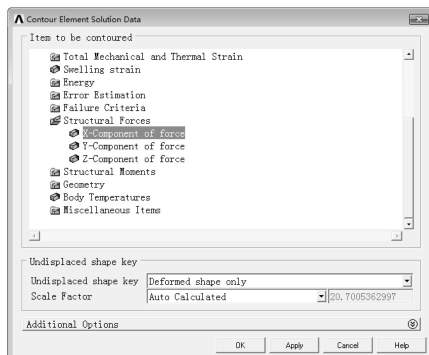


图 8-104　Contour Element Solotion Data 对话框

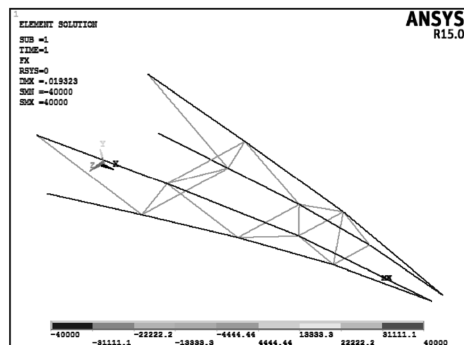


图 8-105　显示轴力 X

参考上述方法请读者自行练习显示 Y、Z 方向的轴力，结果如图 8-106 和图 8-107 所示。

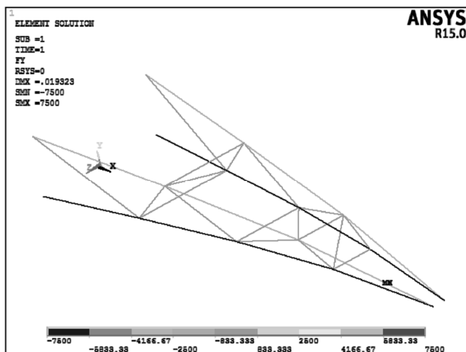


图 8-106　显示轴力 Y

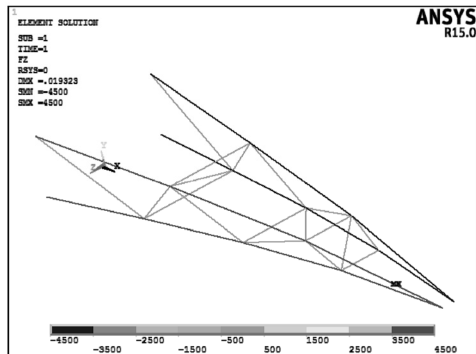


图 8-107　显示轴力 Z

8.3.12　查询 E 点的挠度

参考上文的介绍，在工作区中显示节点位移的云图，如图 8-108 所示。

在 GUI 界面中显示 Menu> General Postproc> Query Results>SubgridSolu 命令，弹出图 8-109 所示的 Query Subgrid Solution Data 对话框。

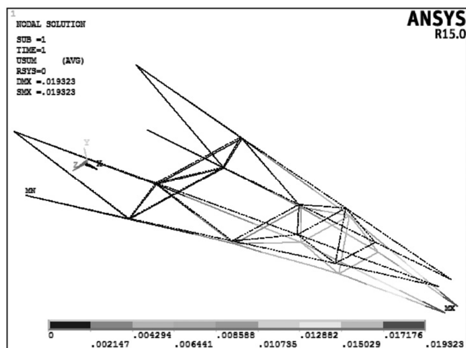


图 8-108　节点位移云图

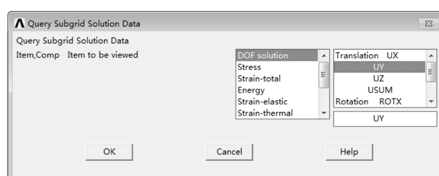


图 8-109　Query Subgrid Solution Data 对话框

在 Query Subgrid Solution Data 对话框中选择 DOF solution> UY，单击 OK 按钮，弹出图 8-110 所示的 Query Subgrid Results 对话框。单击 Min 按钮，图 8-110 所示的 Query Subgrid Rresults 对话框即显示应力最大点的坐标及坐标信息，同时该点的应力值也在工作区中被标出，如图 8-111 所示。

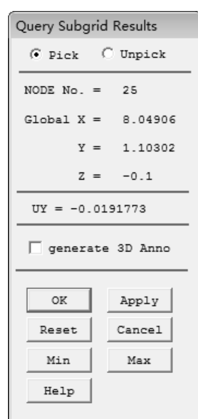


图 8-110 Query Subgrid Results 对话框

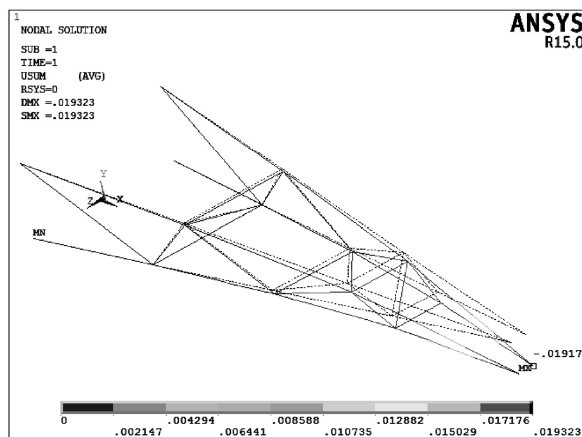


图 8-111 工作区中显示的应力最大点

单击工具栏中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框。选择 Save Everything，保存所有项目，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

8.4 模型简化方法实例

如图 8-112 所示的简化带轮模型，轮外径 600mm，轮辐直径 500 mm，轮厚度 80 mm，轮辐厚度 50 mm，轴孔直径 100 mm，轮辐圆角半径 10 mm。带轮的额定转速为 4500r/min，材料为 40Cr，弹性模量为 E=206GPa，泊松比为 0.3，密度为 7.85×10^3kg/m^3，材料许用应力为 300MPa。下面将利用 ANSYS 通过有限元方法校核其是否安全。

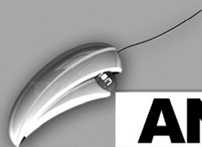
8.4.1 设置分析环境

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。

2）在 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 中输入工作目录名称，在 Job Name 输入项目名称 8-4。

单击 Run 按钮，如果上一步输入的工作目录不存在，则会弹出如图 8-113 所示的 ANSYS Mechanical APDL Launcher Query 对话框。

图 8-113 所示的对话框提示用户上一步输入的工作目录不存并询问是否创建，单击 Yes 按钮，进入 ANSYS 图形界面（GUI）。



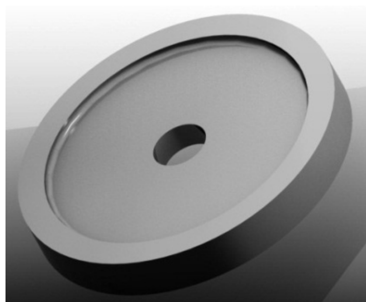


图 8-112　几何模型

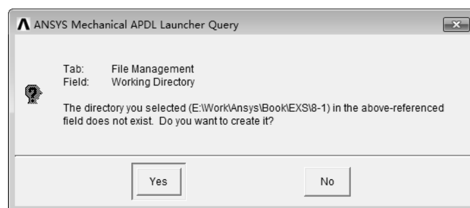


图 8-113　ANSYS Mechanical APDL Launcher Query

3）如图 8-114 所示，图形界面默认是黑色背景，用户可以根据需要将其更改。在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls> Style> Colors> Reverse Video，则工作区背景改为图 8-115 所示的白色。

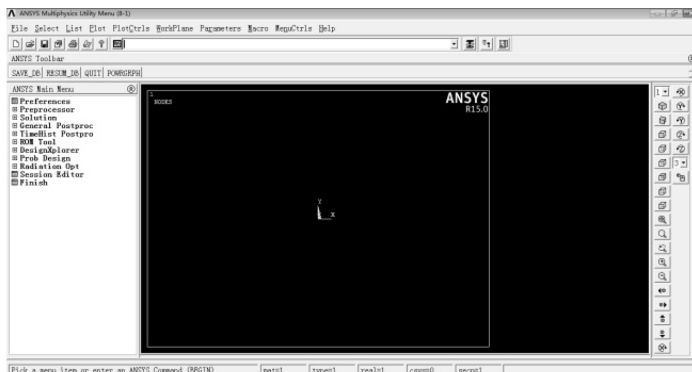


图 8-114　工作区背景为黑色

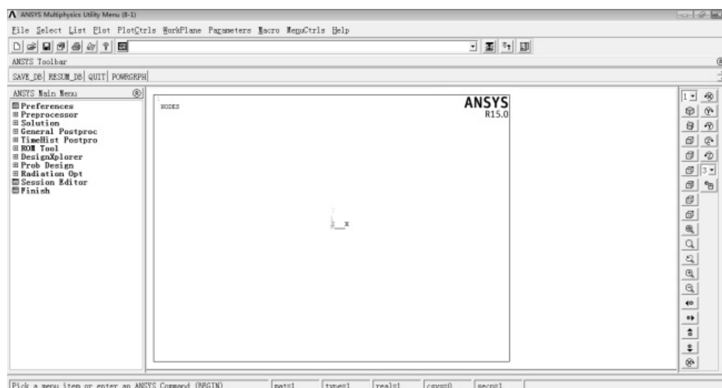


图 8-115　将工作区背景反色

4）在主菜单元中选择 Preferences 命令，弹出图 8-116 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框。

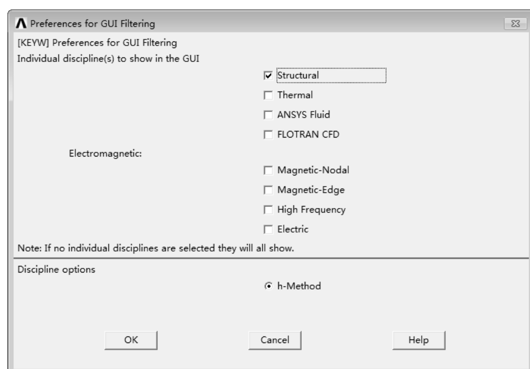


图 8-116 Preferences for GUI Filtering 对话框

选择分析类型为 Structural，单击 OK 按钮，完成分析环境设置。

8.4.2 定义单元与材料

本例分析的是一个三维的带轮模型。实际上，带轮在离心作用上只需要分析其截面即可。本例实际是平面问题，下面将对其进行平面建模。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 命令，弹出图 8-117 所示的 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出图 8-118 所示的 Library of Element Types 对话框，选择单元类型为 Quad 4 node 182，单击 OK 按钮完成。

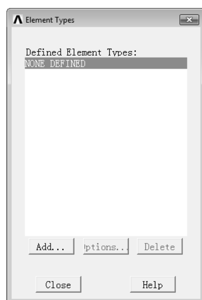


图 8-117 Element Types 对话框

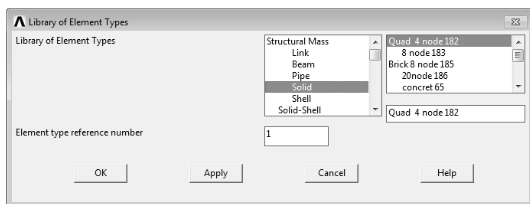


图 8-118 Library of Element Types 对话框

回到图 8-117 所示的 Element Types 对话框，选择上一步定义的 PLANE182 单元，单击 Options 按钮，弹出图 8-119 所示的 PLANE182 element type options 对话框，设置 K3 为 Axisymmetric。即定义单元的行为为旋转对称。

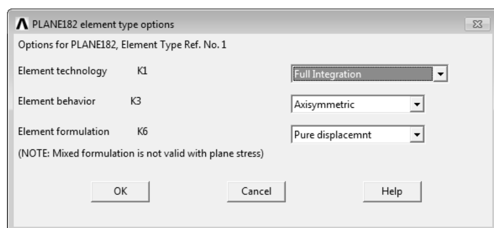


图 8-119 PLANE182 element type options 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，弹出图 8-120 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择结构分析、线性、弹性、各向同性模型，位置如图 8-120 所示，单击 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，输入参数如图 8-121 所示，单击 OK 按

钮完成材料弹性模量与泊松比的定义。

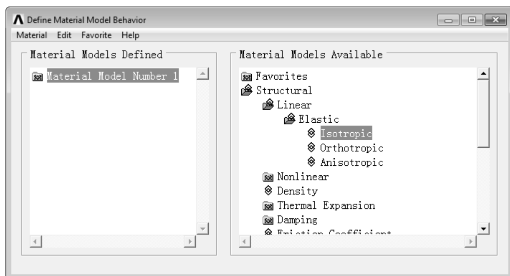


图 8-120 Define Material Model Behavior 对话框

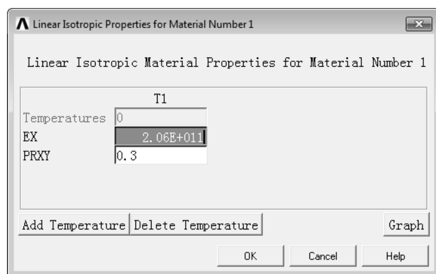


图 8-121 定义弹性模量与泊松比

重复上述操作，在 Define Material Model Behavior 对话框选择 Density，输入密度值 7850。完成材料定义。

8.4.3 建立模型

完成单元与材料参数定义后，即可以开始建立几何模型。在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 命令，弹出图 8-122 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，输入第一个关键点编号 1，坐标如图 8-122 所示，单击 Apply 按钮，继续输入关键点的编号与坐标，直至完成表 8-8 列出的全部关键点定义。

完成定义的关键点如图 8-123 所示。

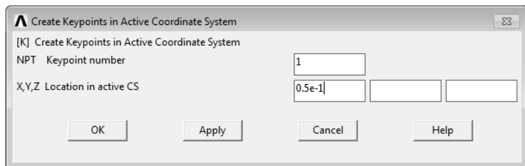


图 8-122 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

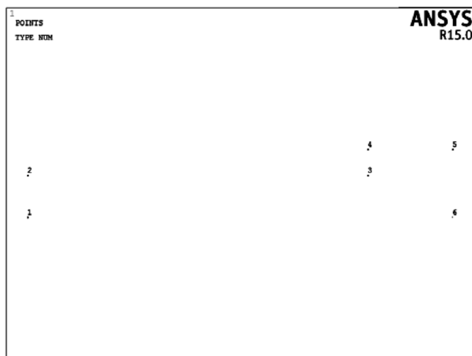


图 8-123 定义关键点

表 8-8 关键点坐标

关 键 点 号	X	Y	Z
1	5.00E-02		
2	5.00E-02	2.50E-02	
3	0.25	2.50E-02	
4	0.25	4.00E-02	
5	0.3	4.00E-02	
6	0.3		

完成关键点定义后，将之连接。在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Line 命令，在工作区中拾取 1 号与 2 号关键点，单击 Apply 按钮，将两个点连接。

继续拾取，每拾取两个点单击一次 Apply 按钮，直到将 1 与 2、2 与 3、3 与 4、4 与 5、5 与 6、6 与 1 关键点顺序连接，如图 8-124 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Line Fillet 命令，拾取 2 号线与 3 号线，单击 OK 按钮，弹出图 8-125 所示的 Line Fillet 对话框，输入圆角半径 0.01，单击 OK 按钮，完成倒圆角如图 8-126 所示。

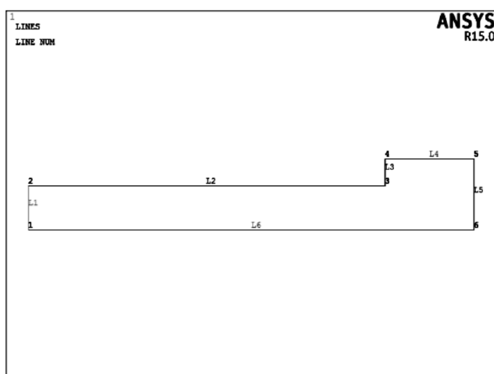


图 8-124　连线

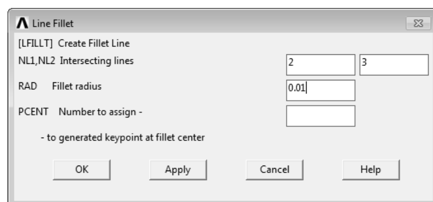


图 8-125　Line Fillet 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>By Lines 命令，拾取工作区中的所有线，单击 OK 按钮，将其围成面如图 8-127 所示。

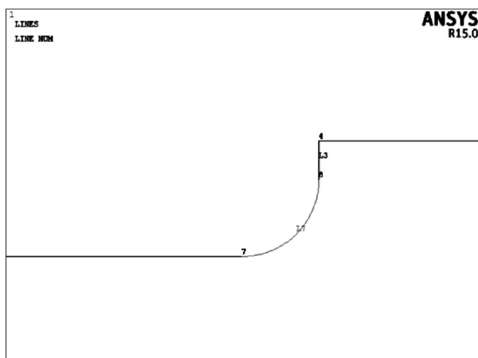


图 8-126　圆角

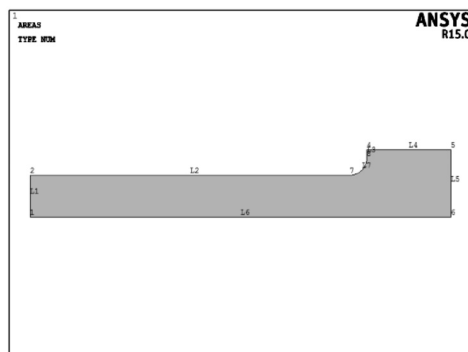
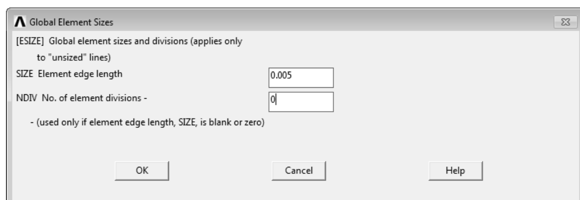


图 8-127　生成面

完成几何模型建立后，即可以划分网格。在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size 命令，弹出图 8-128 所示的 Gloabal Element Sizes 对话框，设置单元尺寸为 0.005，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Free 命令，单击 Pick All 按钮，完成划分如图 8-129 所示。



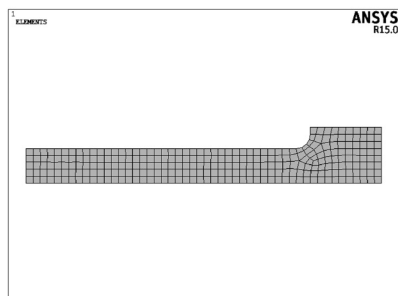


图 8-128　Gloabal Element Sizes 对话框

图 8-129　划分单元

完成网格划分后，开始加载。在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 命令，弹出图 8-130 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static，即静态分析，单击 OK 按钮完成分析类型的定义。

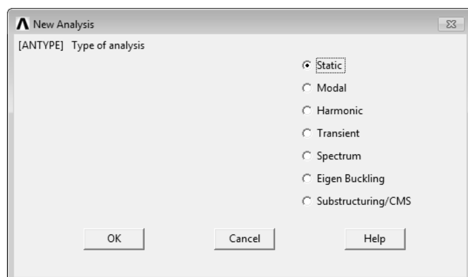


图 8-130　New Analysis 对话框

8.4.4 加载及求解

下面开始施加载荷。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply> Structural> Displacement>Symmetry B.C.>On Lines 命令或 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply> Structural>Displacement>Antisymm B.C.>On Lines 命令，在工作区中拾取 6 号线，单击 OK 按钮，施加称约束。完成施加的对称约束如图 8-131 所示。

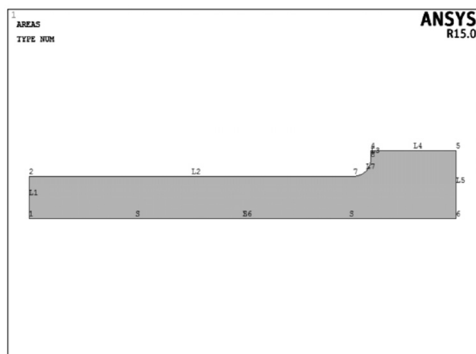


图 8-131　对称约束

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply> Structural> Inertia>Angular Veloc>Global 命令或者 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural> Inertia>Angular Veloc>Global 命令。

在弹出的图 8-132 所示的 Apply Angular Velocity 对话框中，输入 Y 轴角速度值为 4500*2*3.1415927/60，单击 OK 按钮。完成定义的角速度如图 8-133 所示，注意图中的蓝色箭头。

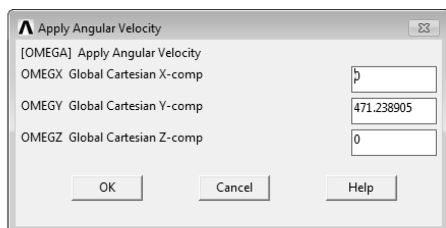


图 8-132 Apply Angular Velocity 对话框

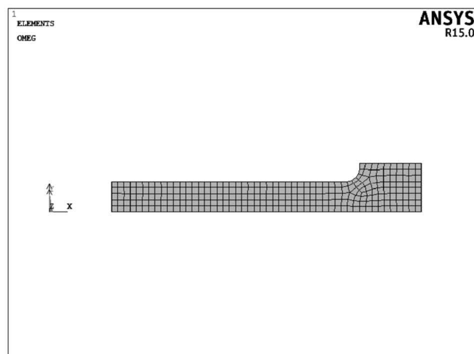
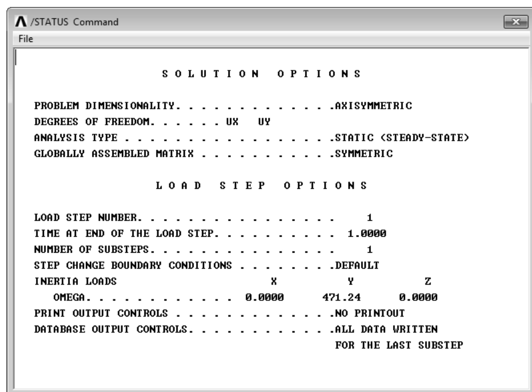


图 8-133 定义向心加速度

完成载荷施加后，即可以开始求解。

在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 8-134 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 8-135 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。



/STATUS Command
File

S O L U T I O N   O P T I O N S

PROBLEM DIMENSIONALITY. . . . . .AXISYMMETRIC
DEGREES OF FREEDOM. . . . . . UX UY
ANALYSIS TYPE . . . . .STATIC (STEADY-STATE)
GLOBALLY ASSEMBLED MATRIX . . . . .SYMMETRIC

L O A D   S T E P   O P T I O N S

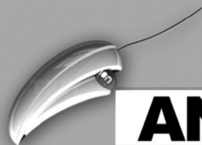
LOAD STEP NUMBER. 1
TIME AT END OF THE LOAD STEP. 1.0000
NUMBER OF SUBSTEPS. 1
STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS . . . . .DEFAULT
INERTIA LOADS X Y Z
OMEGA. 0.0000 471.24 0.0000
PRINT OUTPUT CONTROLS . . . . .NO PRINTOUT
DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . .ALL DATA WRITTEN
FOR THE LAST SUBSTEP

图 8-134 STATUS Command 窗口



图 8-135 Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出图 8-136 所示的 Solution is done!提示时，求解完成。



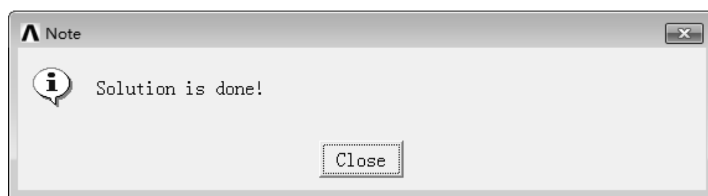


图 8-136　Solution is done!提示

本例也可以使用命令流进行求解。

```
fini
/cle                                          !清理工作区
/prep7                                        !进入前处理器
et，1，182                                    !定义单元 PLANE182
keyopt，1，3，1                               !设置单元选项
mp，ex，1，206e9                              !定义材料参数
mp，prxy，1，0.3                              !
mp，dens，1，7850                             !
k，1，0.5e-1，                                !定义关键点
k，2，0.5e-1，0.25e-1，0                      !
k，3，0.25，0.25e-1，                         !
k，4，0.25，0.4e-1，                          !
k，5，0.3，0.4e-1，                           !
k，6，0.3，                                   !
                                              !
lstr，1，2                                    !连接关键点
lstr，2，3                                    !
lstr，3，4                                    !
lstr，4，5                                    !
lstr，5，6                                    !
lstr，6，1                                    !
                                              !
lfillt，2，3，0.01                            !定义圆角
al，all                                       !将线围成面
                                              !
esize，0.005，0                               !定义单元尺寸
amesh，all                                    !划分网格
fini                                          !
                                              !
/solu                                         !进入求解器
antype，0                                     !定义分析类型静态分析
dl，6，，symm                                 !定义对称约束
omega，0，4500*2*3.1415927/60，0，0           !施加角速度
solve                                         !求解
fini                                          !
```

8.4.5 后处理

完成求解后，即可以进入后处理器查看求解的结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results>Deformed Shape 命令，弹出图 8-137 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在图 8-137 所示的 Plot Deformed Shape 对话框中选择 Def+undef edge 选项，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示如图 8-138 所示的变形图。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 8-139 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

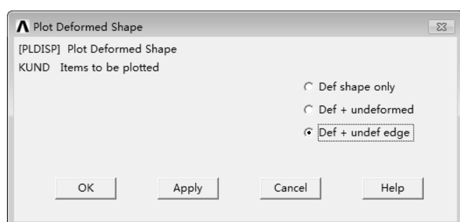


图 8-137 Plot Deformed Shape 对话框

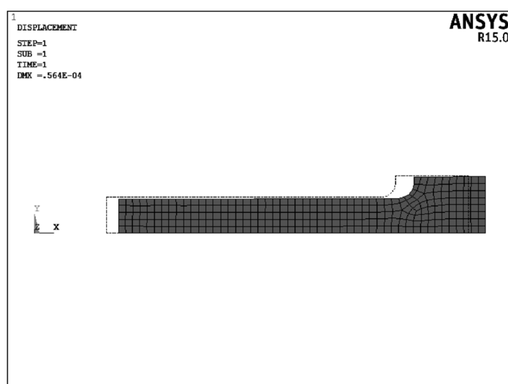


图 8-138 变形图

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 8-140 所示。

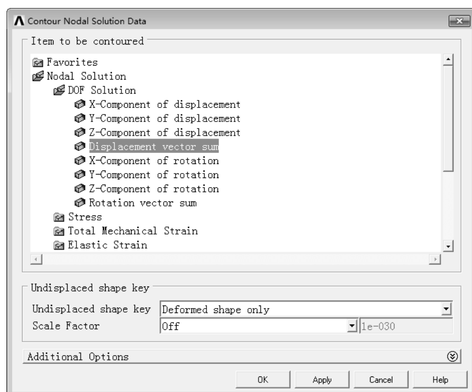


图 8-139 Contour Nodal Solution Data 对话框

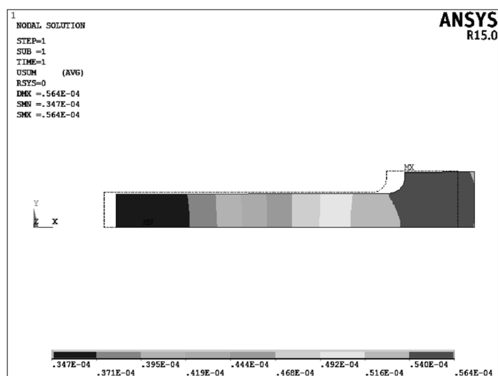


图 8-140 位移云图

同样的方法显示项目应力的节点解如图 8-141～图 8-144 所示。

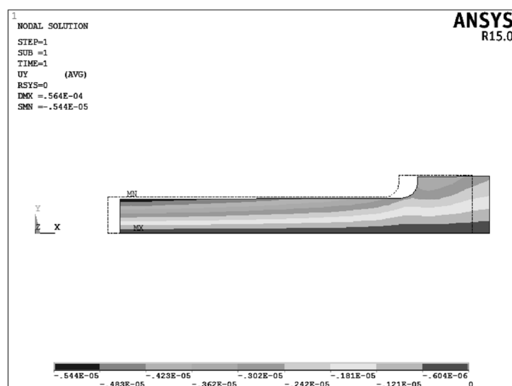


图 8-141　Y 方向应力云图

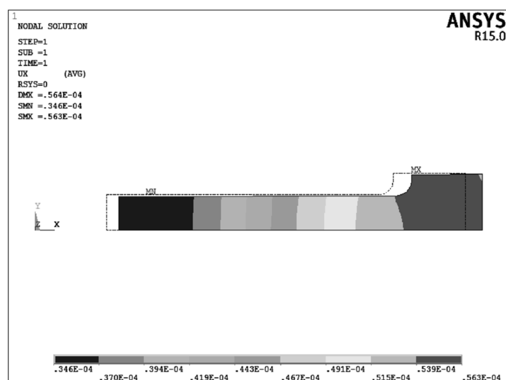


图 8-142　X 方向应力云图

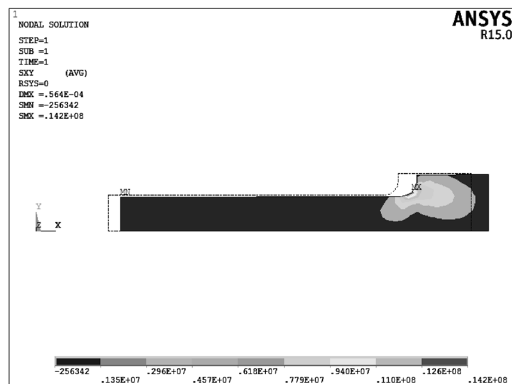


图 8-143　XY 剪应力云图

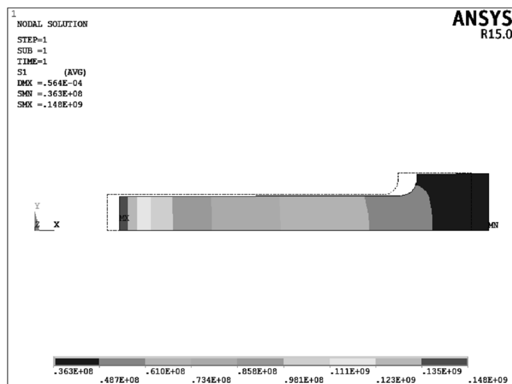


图 8-144　第一主应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Element Solu，选择单元解的项目，显示单元解结果如图 8-145～图 8-148 所示。

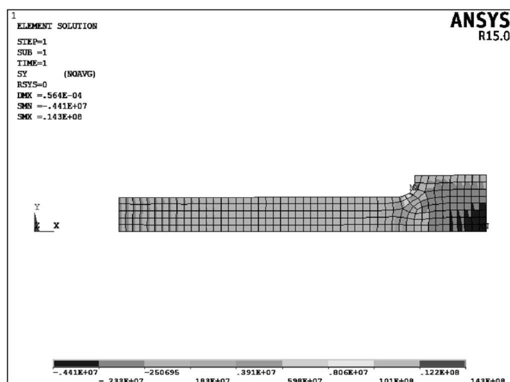


图 8-145　Y 方向单元应力

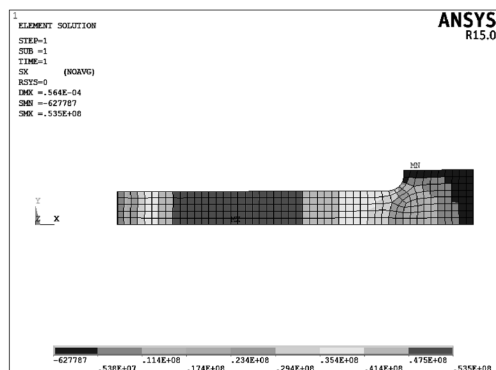


图 8-146　X 方向单元应力

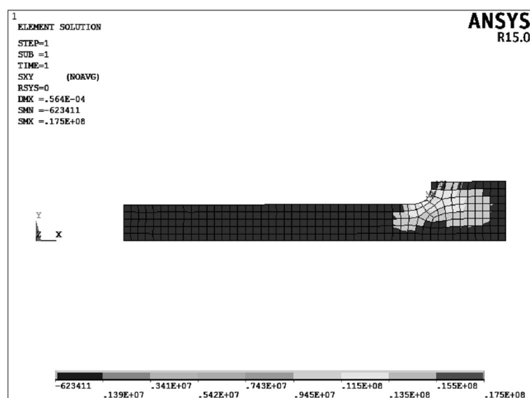


图 8-147 XY 单元剪应力

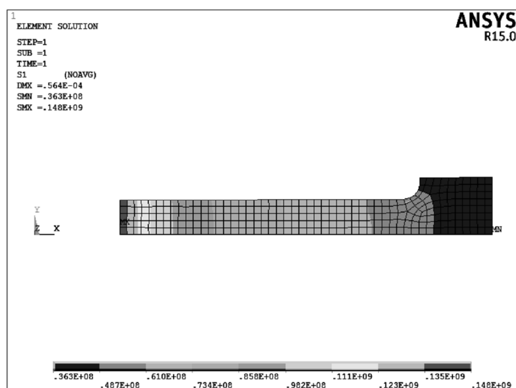


图 8-148 单元第一主应力

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Vector Plot> Predefined 命令，弹出图 8-149 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

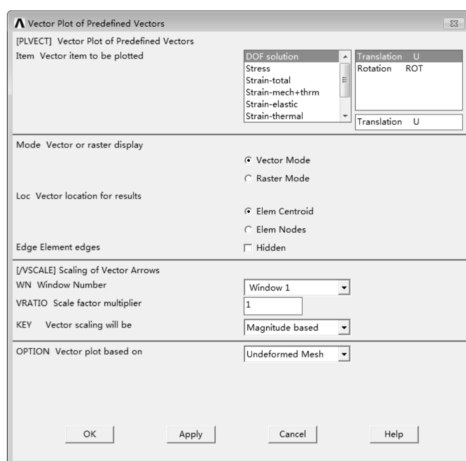


图 8-149 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮则显示图 8-150 所示的平移矢量，选择显示的矢量为 Rotation ROT，单击 OK 按钮则显示图 8-151 所示的主应力矢量。

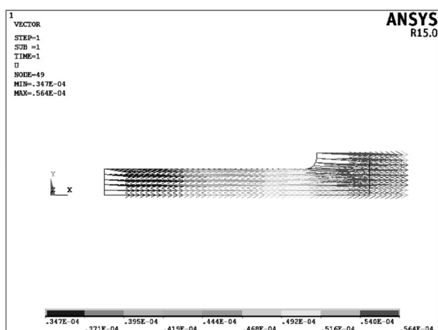


图 8-150 平移矢量

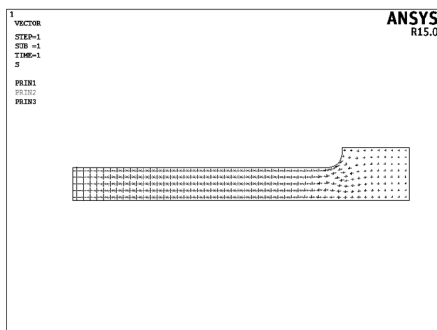


图 8-151 主应力矢量

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls> Symbols 命令，弹出图 8-152 所示的 Symbols 对话框。

在 Symbols 设置对话框中选择 All Reactions，单击 OK 按钮。在 GUI 界面选择 Utility Menu> Plot> Elements 命令，工作区即可显示图 8-153 所示的约束节点反力。

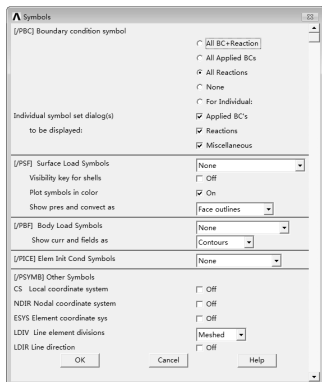


图 8-152　Symbols 对话框

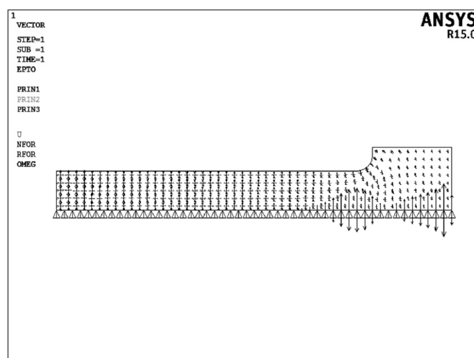


图 8-153　显示应力矢量与约束节点反力

参考上文的介绍，在工作区中显示第一主应力节点解的云图。

在 GUI 界面中显示 Menu> General Postproc> Query Results>SubgridSolu 命令，弹出图 8-154 所示的 Query Subgrid Solution Data 对话框。

在 Query Subgrid Solution Data 对话框中选择 Stress> 1st principal S1，单击 OK 按钮，弹出图 8-155 所示的 Query Subgrid Results 对话框。

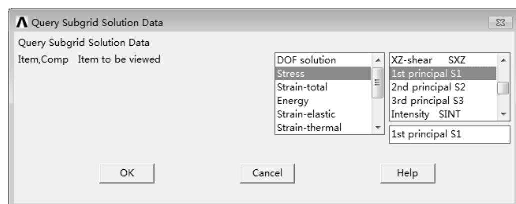


图 8-154　Query Subgrid Solution Data 对话框

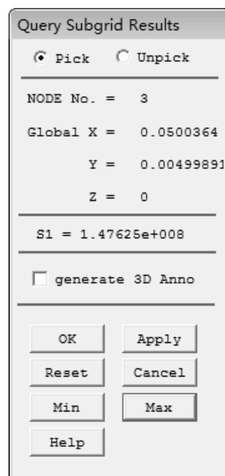


图 8-155　Query Subgrid Results 对话框

单击 Max 按钮，Query Subgrid Results 对话框即显示应力最大点的坐标及坐标信息，同时该点的应力值也在工作区中被标出，如图 8-156 所示。

单击工具栏中的 QUIT 按钮，弹出图 8-157 所示的 Exit from ANSYS 对话框。

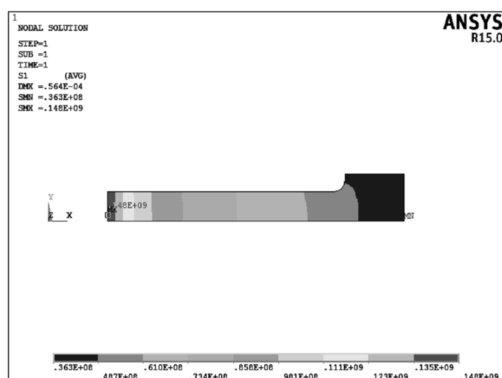


图 8-156 工作区中显示的应力最大点

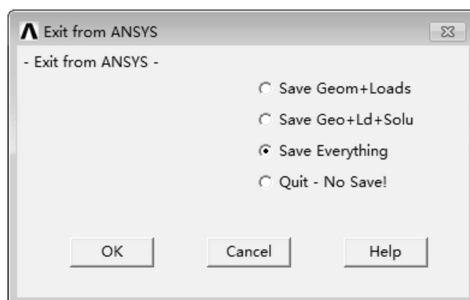


图 8-157 Exit from ANSYS 对话框

选择 Save Everything，保存所有项目，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

8.5 本章小结

静力分析是进行 ANSYS 有限元分析的基础，学好静力学分析，才可能进一步理解动力学分析、热分析等更为复杂的分析形式。

本章精选的实例有偏重于几何模型复杂的、有偏重于建模型方式独特的（没有几何模型只有有限元模型）、有简化问题进行处理的，读者经过本章的练习，根据面对的分析问题的不同，采用合理的思路进行应用，应当可以处理一些简单的静力学问题。

第 9 章　加工过程仿真分析

金属热加工是应用非常广泛的加工方法。进行热加工的金属由于温度、受力等均为极端环境，加工过程是否会导致工件或工具损伤，完成加工后是否有应力残留等问题，在 ANSYS 中均可以进行仿真分析，ANSYS 的热分析功能即在此场合发挥其作用。

热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度、热流密度（热通量）等。热分析在许多工程应用中扮演重要角色，如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元器件等。

在 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/ED 五种产品中包含热分析功能，其中 ANSYS/FLOTRAN 不含相变热分析。ANSYS 热分析基于能量守恒原理的热平衡方程，用有限元法计算各节点的温度，并导出其他热物理参数。ANSYS 热分析包括热传导、热对流和热辐射 3 种热传递方式。此外，还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。

ANSYS 热分析分为两大类，即传统的热分析和热耦合分析。

依据温度场与时间的变化关系，ANSYS 热分析可以分为稳态传热和瞬态传热两种：稳态传热就是系统的温度场不随时间变化；瞬态传热就是系统的温度场随时间明显变化。

耦合分析就是将热分析与其他类型的分析结合起来进行分析。ANSYS 可进行的热耦合分析包括：热-结构耦合分析、热-流体耦合分析、热-电耦合分析、热-磁耦合分析、热-电-磁-结构耦合分析。

本章将介绍一些进行热分析的基础知识。作为进行 ANSYS 热分析的准备知识，设计人员应使用这些基础知识作为判断 ANSYS 计算结果的依据。

本章学习目标

- 了解 ANSYS 热分析的基础知识。
- 掌握进行稳态传热分析的方法。
- 掌握进行瞬态传热分析的方法。
- 了解相变问题的分析方法。
- 掌握热应力求解的方法。

9.1　热力学基础知识

在进行实例介绍之前将先为读者介绍一些有关热力学的基础知识。在此只介绍一些最基本的与本书讲解内容相关的知识，如果读者能参考相关书籍，深入理解专业知识，对分析结果判断、误差分析将大有裨益。

9.1.1 符号与单位

表 9-1 所示为热分析所涉及的单位。

表 9-1 热分析单位

项 目	国 际 单 位	英 制 单 位	ANSYS 代号
长度	m	ft	
时间	s	s	
质量	kg	lbm	
温度	^{o}C	^{o}F	
力	N	lbf	
能量（热量）	J	BTU	
功率（热流率）	W	BTU/sec	
热流密度	W/m^2	BTU/sec-ft^2	
生热速率	W/m^3	BTU/sec-ft^3	
导热系数	W/m • K	BTU/sec-ft-^{o}F	KXX
对流系数	W/m^2 • K	BTU/sec-ft^2-^{o}F	HF
密度	kg/m^3	lbm/ft^3	DENS
比热	J/kg • K	BTU/lbm-^{o}F	C
焓	J/m^3	BTU/ft^3	ENTH

9.1.2 传热学经典理论回顾

热分析遵循热力学第一定律，即能量守恒定律：

对于一个封闭的系统（没有质量的流入或流出）

$$Q-W=\Delta U+\Delta KE+\Delta PE$$

式中，Q 是热量；W 是做功；ΔU 是系统内能；ΔKE 是系统动能；ΔPE 是系统势能。

对于大多数工程传热问题：$\Delta KE= \Delta PE=0$。

通常考虑没有做功：$W=0$，则 $Q= \Delta U$。

对于稳态热分析：$Q= \Delta U=0$，即流入系统的热量等于流出的热量。

对于瞬态热分析：$q=\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}$，即流入或流出的热传递速率 q 等于系统内能的变化。

9.1.3 热传递的方式

（1）热传导

热传导可以定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能的交换。热传导遵循傅里叶定律：$q''=-k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$。

式中，q'' 为热流密度（W/m^2），k 为热导系数（W/(m • K)），“−”表示热量流向温度降低的方向。

（2）热对流

热对流是指固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在引起的热量的交换。热对流可以分为两类：自然对流和强制对流。热对流用牛顿冷却方程来描述：$q''=h(T_s-T_B)$。

式中，h 为对流换热系数（或称膜传热系数、给热系数、膜系数等），T_s 为固体表面的温度，T_B 为周围流体的温度。

（3）热辐射

热辐射指物体发射电磁能，并被其他物体吸收转变为热的热量交换过程。物体温度越高，单位时间辐射的热量越多。热传导和热对流都需要有传热介质，而热辐射无须任何介质。实质上，在真空中的热辐射效率最高。

在工程中通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射，系统中每个物体同时辐射并吸收热量。它们之间的净热量传递可以用斯蒂芬–波尔兹曼方程来计算：

$$q=\varepsilon\sigma A_1 F_{12}(T_1^4-T_2^4)$$

式中，q 为热流率；ε为辐射率（黑度）；σ为斯蒂芬–波尔兹曼常数，约为$5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/m^2\bullet K^4}$；$A_1$ 为辐射面 1 的面积；F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数；T_1 为辐射面 1 的热力学温度；T_2 为辐射面 2 的热力学温度。

由上式可以看出，包含热辐射的热分析是高度非线性的。

（4）稳态传热

如果系统的净热流率为 0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量：$q_{流入}+q_{生成}+q_{流出}=0$，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为（以矩阵形式表示）：

$$[K]\{T\}=\{Q\}$$

式中，$[K]$为传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；$\{T\}$为节点温度向量；$\{Q\}$为节点热流率向量，包含热生成。

ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件，生成$[K]$、$\{T\}$以及$\{Q\}$。

（5）瞬态传热

瞬态传热过程是指一个系统的加热或冷却过程。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，瞬态热平衡可以表达为（以矩阵形式表示）：

$$[C]\{\dot{T}\}+[K]\{T\}=[Q]$$

式中，$[K]$为传导矩阵，包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数；$[C]$为比热矩阵，考虑系统内能的增加；$[T]$为节点温度向量；$[\dot{T}]$为温度对时间的导数；$\{Q\}$为节点热流率向量，包含热生成。

9.1.4 线性与非线性

如果有下列情况产生，则为非线性热分析：

- 材料热性能随温度变化，如 $K(T)$、$C(T)$等。
- 边界条件随温度变化，如 $h(T)$等。
- 含有非线性单元。

● 考虑辐射传热。

非线性热分析的热平衡矩阵方程为：

$$[C(T)]\{\dot{T}\}+[K(T)]\{T\}=[Q(T)]$$

式中各参数含义同上。

9.1.5 边界条件、初始条件

ANSYS 热分析的边界条件或初始条件可分为 7 种：温度、热流率、热流密度、对流、辐射、绝热和生热。

9.1.6 热分析误差估计

热分析误差估计能满足以下的需求。

● 仅用于评估由于网格密度不够所带来的误差。
● 仅适用于 SOLID 或 SHELL 的热单元（只有温度一个自由度）。
● 基于单元边界的热流密度的不连续。
● 仅对一种材料、线性、稳态热分析有效。
● 使用自适应网格划分可以对误差进行控制。

9.2 焊接过程仿真

焊接是指被焊工件的材质（同种或异种），通过加热或加压或两者并用，并且用（或不用）填充材料，使工件的材质达到原子间的相互扩散而形成永久性连接的工艺过程。

本例中将对金属的焊接过程进行有限元分析，利用生死单元技术并配合 ANSYS 可以分析相变过程的强大分析能力，模拟焊接的焊缝连接过程。

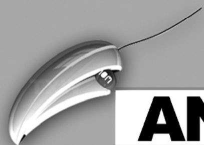
9.2.1 概述

焊接过程中，工件和焊料熔化形成熔融区域，熔池冷却凝固后便形成材料之间的连接。这一过程中，通常还需要施加压力。焊接的能量来源有很多种，包括气体焰、电弧、激光、电子束、摩擦和超声波等。19 世纪末之前，唯一的焊接工艺是铁匠沿用了数百年的金属锻焊。最早的现代焊接技术出现在 19 世纪末，先是弧焊和氧燃气焊，稍后出现了电阻焊。20 世纪早期，随着第一次和第二次世界大战开战，对军用器材廉价可靠的连接方法需求极大，故促进了焊接技术的发展。今天，随着焊接机器人在工业应用中的广泛应用，研究人员仍在深入研究焊接的本质，继续开发新的焊接方法，以进一步提高焊接质量。

焊接是两种或两种以上同种或异种材料通过原子或分子之间的结合和扩散连接成一体的工艺过程。促使原子和分子之间产生结合和扩散的方法是加热或加压，或同时加热又加压。

金属的焊接，按其工艺过程的特点分有熔焊、压焊和钎焊三大类。

熔焊是在焊接过程中将工件接口加热至熔化状态，不加压力完成焊接的方法。熔焊时，热源将待焊两工件接口处迅速加热熔化，形成熔池。熔池随热源向前移动，冷却后形成连续焊缝而将两工件连接成为一体。在熔焊过程中，如果大气与高温的熔池直接接触，大气中的



氧就会氧化金属和各种合金元素。大气中的氮、水蒸气等进入熔池，还会在随后冷却过程中在焊缝中形成气孔、夹渣、裂纹等缺陷，恶化焊缝的质量和性能。为了提高焊接质量，人们研究出了各种保护方法。例如，气体保护电弧焊就是用氩、二氧化碳等气体隔绝大气，以保护焊接时的电弧和熔池率；又如，钢材焊接时，在焊条药皮中加入对氧亲和力大的钛铁粉进行脱氧，就可以保护焊条中有益元素锰、硅等免于氧化而进入熔池，冷却后获得优质焊缝。

压焊是在加压条件下，使两工件在固态下实现原子间结合，又称固态焊接。常用的压焊工艺是电阻对焊，当电流通过两工件的连接端时，该处因电阻很大而温度上升，当加热至塑性状态时，在轴向压力作用下连接成为一体。各种压焊方法的共同特点是在焊接过程中施加压力而不加填充材料。多数压焊方法（如扩散焊、高频焊、冷压焊等）都没有熔化过程，因而没有像熔焊那样的有益合金元素烧损和有害元素侵入焊缝的问题，从而简化了焊接过程，也改善了焊接安全卫生条件。同时，由于加热温度比熔焊低、加热时间短，因而热影响区小。许多难以用熔焊焊接的材料，往往可以用压焊焊成与母材同等强度的优质接头。

钎焊是使用比工件熔点低的金属材料作钎料，将工件和钎料加热到高于钎料熔点、低于工件熔点的温度，利用液态钎料润湿工件，填充接口间隙并与工件实现原子间的相互扩散，从而实现焊接的方法。

焊接时形成的连接两个被连接体的接缝称为焊缝。焊缝的两侧在焊接时会受到焊接热作用，而发生组织和性能变化，这一区域被称为热影响区。焊接时因工件材料、焊接材料、焊接电流等不同，焊后在焊缝和热影响区可能产生过热、脆化、淬硬或软化现象，也使焊件性能下降，恶化焊接性。这就需要调整焊接条件，焊前对焊件接口处预热、焊时保温和焊后热处理可以改善焊件的焊接质量。

另外，焊接是一个局部的迅速加热和冷却过程，焊接区由于受到四周工件本体的拘束而不能自由膨胀和收缩，冷却后在焊件中便产生焊接应力和变形。重要产品焊后都需要消除焊接应力，矫正焊接变形。

现代焊接技术已能焊出无内外缺陷的、机械性能等于甚至高于被连接体的焊缝。被焊接体在空间的相互位置称为焊接接头，接头处的强度除受焊缝质量影响外，还与其几何形状、尺寸、受力情况和工作条件等有关。如图 9-1 所示为现代工程中使用的自动焊接机。


图 9-1　自动焊接机

接头的基本形式有对接、搭接、丁字接（正交接）和角接等。对接接头焊缝的横截面形状，决定于被焊接体在焊接前的厚度和两接边的坡口形式。焊接较厚的钢板时，为了焊透而在接边处开出各种形状的坡口，以便较容易地送入焊条或焊丝。坡口形式有单面施焊的坡口和两面施焊的坡口。

选择坡口形式时，除保证焊透外还应考虑施焊方便，填充金属量少，焊接变形小和坡口加工费用低等因素。厚度不同的两块钢板对接时，为避免截面急剧变化引起严重的应力集中，常把较厚的板边逐渐削薄，达到两接边处等厚。对接接头的静强度和疲劳强度比其他接头高。在交变、冲击载荷下或在低温高压容器中工作的连接，常优先采用对接接头的焊接。搭接接头的焊前准备工作简单，装配方便，焊接变形和残余应力较小，因而在工地

安装接头和不重要的结构上时常采用。

一般来说，搭接接头不适于在交变载荷、腐蚀介质、高温或低温等条件下工作。采用丁字接头和角接头通常是由于结构上的需要。丁字接头上未焊透的角焊缝工作特点与搭接接头的角焊缝相似。当焊缝与外力方向垂直时便成为正面角焊缝，这时焊缝表面形状会引起不同程度的应力集中；焊透的角焊缝受力情况与对接接头相似。

角接头承载能力低，一般不单独使用，只有在焊透时，或在内外均有角焊缝时才有所改善，多用于封闭形结构的拐角处。焊接产品比铆接件、铸件和锻件重量轻，对于交通运输工具来说可以减轻自重，节省能量。

常见的焊缝形式如图 9-2 所示。

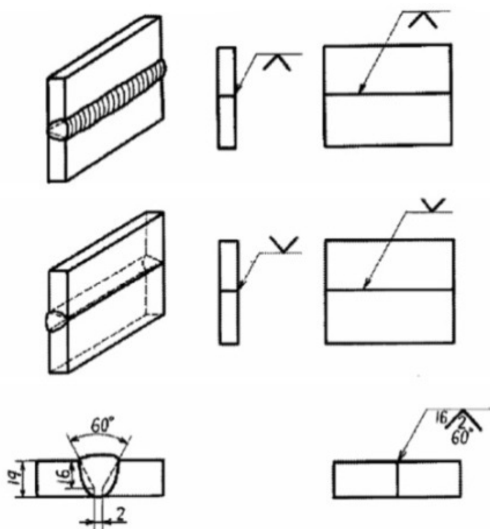


图 9-2 常见的焊缝形式

焊接的密封性好，适于制造各类容器。发展联合加工工艺，使焊接与锻造、铸造相结合，可以制成大型、经济合理的铸焊结构和锻焊结构，经济效益很高。采用焊接工艺能有效利用材料，焊接结构可以在不同部位采用不同性能的材料，充分发挥各种材料的特长，达到经济、优质的目的。

焊接已成为现代工业中一种不可缺少，而且日益重要的加工工艺方法。在近代的金属加工中，焊接比铸造、锻压工艺发展较晚，但发展速度很快。焊接结构的重量约占钢材产量的45%，铝和铝合金焊接结构的比重也不断增加。

未来的焊接工艺，一方面要研制新的焊接方法、焊接设备和焊接材料，以进一步提高焊接质量和安全可靠性，如改进现有电弧、等离子弧、电子束、激光等焊接能源；运用电子技术和控制技术，改善电弧的工艺性能，研制可靠轻巧的电弧跟踪方法。另一方面要提高焊接机械化和自动化水平，如焊机实现程序控制、数字控制；研制从准备工序、焊接到质量监控全部过程自动化的专用焊机；在自动焊接生产线上，推广、扩大数控的焊接机械手和焊接机器人，可以提高焊接生产水平，改善焊接卫生安全条件。

不同焊接工艺的分类如表 9-2 所示。

表 9-2　焊接工艺分类

焊接	熔焊	气焊	
		电弧焊	手工电弧焊
			自动电弧焊
		电渣焊	
		等离子焊	
	压焊	电阻焊	对焊
			点焊
			缝焊
		摩擦焊	
	钎焊	烙铁钎焊	
		盐浴钎焊	
		火焰钎焊	

本例将要分析的为普通熔焊过程，非钎焊，即焊缝材料与工件材料相同。

9.2.2 分析过程

1）设置单元及材料参数。运行如下命令。

```
fini                                    !
/cle
/prep7
et，1，13，4                            !定义单元类型
et，2，13，4
```

定义单元类型的同时也指定了单元的 KEYOPTION 选项，将 K1 设置为 4，即定义可用的自由度有 UX、UY、TEMP、AZ，如图 9-3 所示。继续运行如下命令定义材料模型。

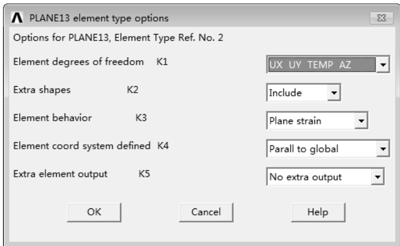


图 9-3　单元 KEYOPTION 选项

```
mp，kxx，1，.246e-3                      ！定义材料的导热系数
mp，kxx，2，.246e-3                      ！
mp，kxx，3，.246e-3                      ！
mp，c，1，.2                             ！定义材料的比热容
mp，c，2，.2                             ！
mp，c，3，.2                             ！
```

```
mp，dens，1，.2833                    ！定义材料密度
mp，dens，2，.2833                    ！
mp，dens，3，.2833                    ！
mp，alpx，1，6.5e-6                   ！定义材料线膨胀系数
mp，alpx，2，6.5e-6                   ！
mp，alpx，3，6.5e-6                   ！
mp，murx，1，1                        ！相对渗透率
mp，murx，2，1                        ！
mp，murx，3，1                        ！
mp，reft，1，3000                     ！定义材料参考数
mp，reft，2，1550                     ！
mp，reft，3，100                      ！
```

完成定义后的材料模型如图 9-4 所示。

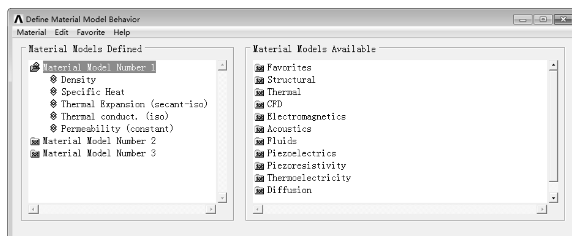


图 9-4　定义 3 种材料模型

2）定义完单元与材料参数后，开始建立模型。本例采用直接建立有限元模型的方法，先定义节点，再将节点直接连接成为单元。运行如下命令定义节点。

```
n，1
n，2，，.39
n，3，，.41
n，4，，.79
n，5，，.81
n，6，，1.2
n，7，.2
n，8，.1，.39
n，9，.1，.41
n，10，.1，.79
n，11，.1，.81
n，12，.2，1.2
n，13，.22
n，14，.12，.40
n，15，.12，.80
n，16，.22，1.2
n，17，.6
n，18，.6，.4
n，19，.6，.8
n，20，.6，1.2
```

生成的节点如图 9-5 所示。

继续运行如下命令。

```
ngen，10，4，17，20，1，.6
```

ngen 命令将 17、18、19、20 四个节点沿 X 正方向复制 10 次，间距为 0.6。完成的节点如图 9-6 所示。

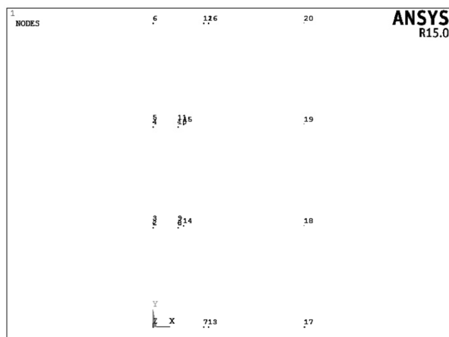


图 9-5　生成节点

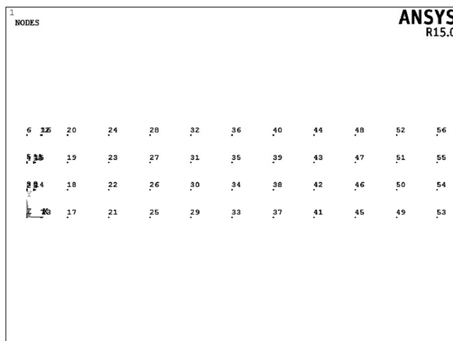


图 9-6　节点阵列

3）定义完成节点后，就可以通过节点生成单元。运行如下命令。

```
type，1                                  !单元类型 1
mat，1                                   !材料模型 1
```

选择单元类型 1 与材料模型 1，用于定义单元。运行如下命令。

```
e，1，7，8，2
```

将节点 1、7、8、2 连接围成单元，如图 9-7 所示。

继续运行如下命令。

```
egen，5，1，-1
```

生成剩余焊缝部分的单元，如图 9-8 所示。

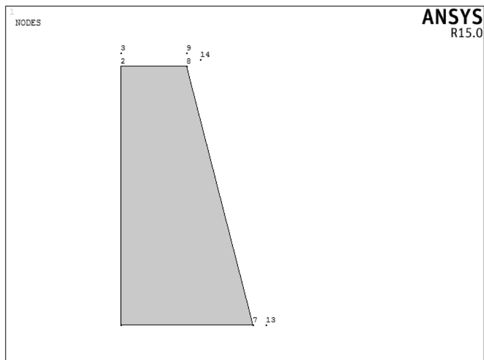


图 9-7　生成单元

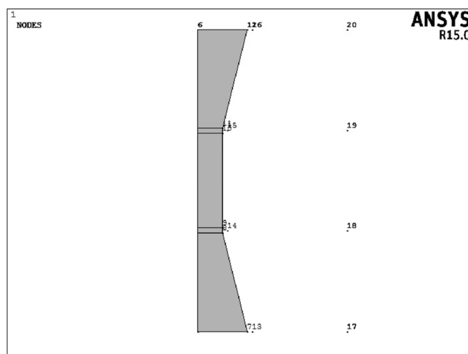


图 9-8　焊缝

4）运行如下命令。

```
mat，2
```

将材料改为 2。继续运行如下命令。

```
e，7，13，14，8
e，8，14，9，9
e，9，14，15，10
e，10，15，11，11
e，11，15，16，12
```

生成单元如图 9-9 所示。
运行如下命令，生成钢板的单元。

```
type，2              !定义生成的单元类型
mat，3
e，13，17，18，14
egen，3，1，-1
egen，10，4，-3
```

完成的有限元模型如图 9-10 所示。

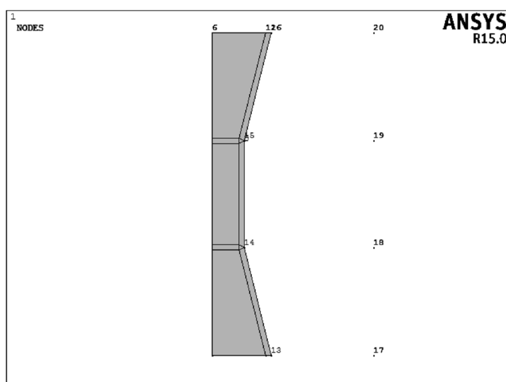


图 9-9 生成焊缝边上的单元

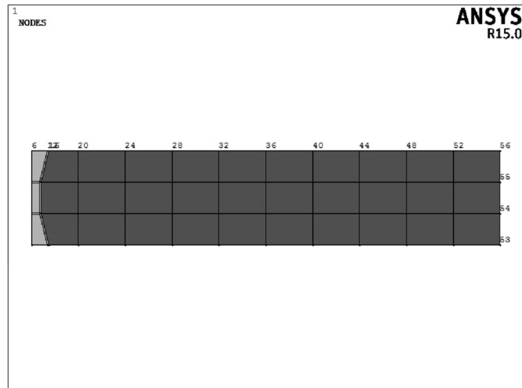


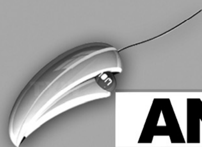
图 9-10 生成有限元模型

5）完成模型建立后即可以开始加载。先定义约束。

```
d，1，ux，0          !定义约束
d，2，ux，0
d，3，ux，0
d，4，ux，0
d，5，ux，0
d，6，ux，0
```

将 1~6 号节点的 X 方向平移自由度约束。运行如下命令。

```
nsel，s，loc，x，6
```




```
nsel，r，loc，y，0
```

选出右端节点，用于加载支座的约束。

```
d，all，uy，0
```

D 命令将选出的右端节点的 Y 方向自由度约束，如图 9-11 所示。

运行如下命令。

```
nsel，all                                   !选出所有节点
d，all，az                                  !约束 Z 方向自由度
```

选出所有节点，约束 Z 方向自由度。

定义完成的约束如图 9-12 所示。

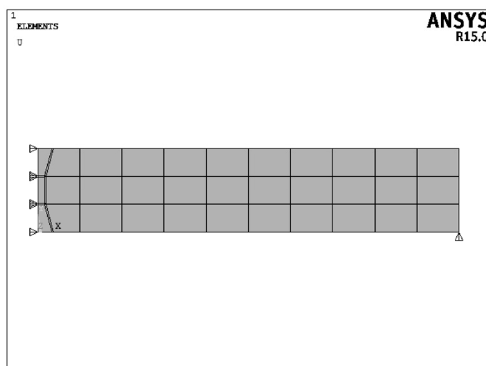


图 9-11　定义 XY 平面内的约束

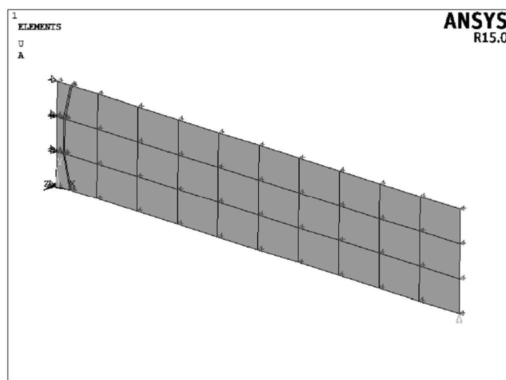


图 9-12　完整约束

6）本例将要考虑材料属性随温度变化，运行如下命令。

```
mptemp，1，100，1000，2400，2700，3000           !属性变化材料参数列表
mpdata，ex，1，1，30e6，30e6，10e6，5e6，.2e6
mpdata，ex，2，1，30e6，30e6，10e6，5e6，.2e6
mpdata，ex，3，1，30e6，30e6，10e6，5e6，.2e6
```

以上命令定义材料的弹性模量随温度改变。

图 9-13 所示的 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框中，列出了材料的弹性模量随温度变化的情况。

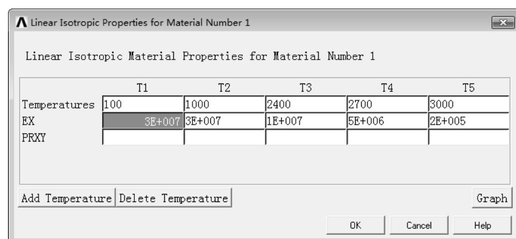


图 9-13　Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框

继续运行如下命令，定义不同温度下材料的屈服强度。

```
tb，bkin，1，5    !定义材料屈服强度
tbtemp，100
tbdata，1，36000，1e6
tbtemp，1000
tbdata，1，36000，1e6
tbtemp，2400
tbdata，1，5000，1e6
tbtemp，2700
tbdata，1，1000，.5e6
tbtemp，3000
tbdata，1，500，.1e6
tbcopy，bkin，1，2
tbcopy，bkin，1，3
```

定义完材料屈服强度后，材料 1 在不同温度下的屈服强度如图 9-14 所示。

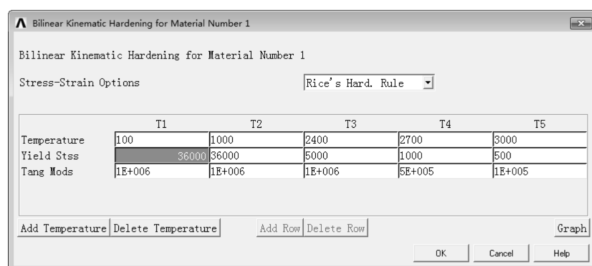


图 9-14　Bilinear Kinematic Hardening for Material Number 1 对话框

至此，前处理完成，进入求解器，进行加载与求解。

7）运行如下命令。

```
/solution                    !进入求解器
antype，transient            !分析类型
timint，off                  !瞬态效应
autots，on                   !动时间步
cnvtol，heat                 !收敛选项
cnvtol，f                    !
outpr，basic，last           !输出控制
outres，，last               !输出控制
kbc，1                       !阶跃载荷
nsubst，1                    !定义载荷步的子步数
```

以上命令定义分析类型为瞬态分析，关闭瞬态效应，打开自动时间步，设置收敛值为 heat，采用阶跃载荷加载，定义载荷步的子步数为 1。继续运行如下命令。

```
ealive，all
```

ealive 命令激活了所有单元。继续运行如下命令。

```
esel, s,,, 1, 5, 2
nsle
d, all, temp, 3000
```

选出如图 9-15 所示的单元，在这些单元的节点上施加温度，定义温度为 3000，如图 9-16 所示。

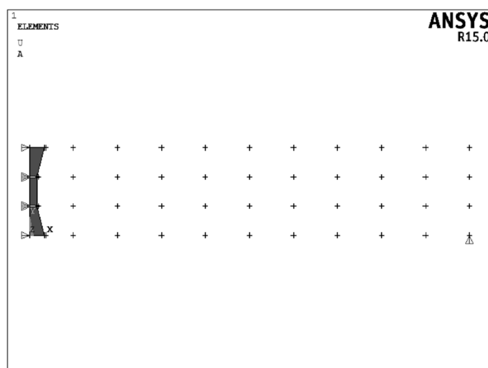


图 9-15　选出焊缝单元

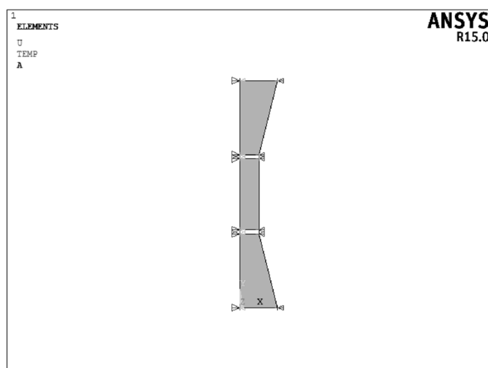


图 9-16　施加温度载荷

继续运行如下命令。

```
nsel, inve
d, all, temp, 100
```

反选出钢板的节点，施加温度载荷为 100，如图 9-17 所示。

8）运行如下命令进行温度求解（第 1 载荷步）。

```
nsel, all            !选择全部对象并开始求解
esel, all
time, 1
solve
```

求解过程收敛曲线如图 9-18 所示。

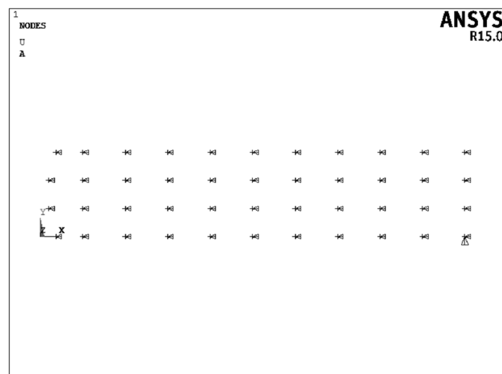


图 9-17　定义钢板温度

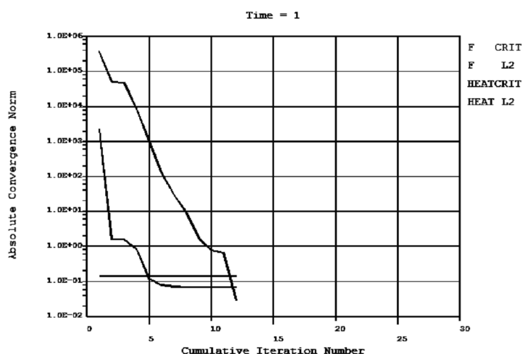


图 9-18　收敛曲线

9）继续运行如下命令。

```
esel，s，，，1，5，2        !选择焊缝
nsle
esln，a
```

选出焊缝的单元与节点如图 9-19 所示。

运行如下命令。

```
cm，wnode，node         !杀死焊缝
cm，welem，elem
ekill，all
```

cm 命令用于定义组件名称，将图 9-19 所示的选出的节点定义为一个组件，名为 wnode，将选出的单元定义为一个组，名为 welem。

ekill 命令杀死了上述单元，此时，焊缝单元“不存在”，如图 9-20 所示。然后即可运行求解命令如下，完成第 2 载荷步求解。

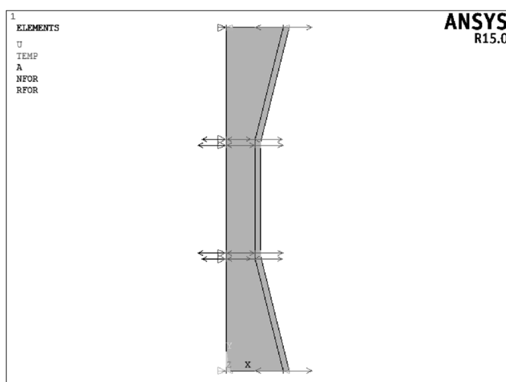


图 9-19　选出焊缝部分单元

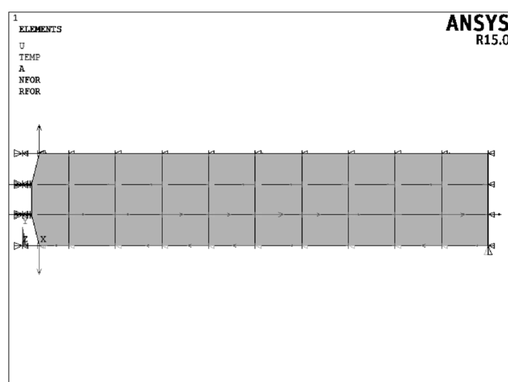


图 9-20 “活”单元

```
nsel，all    !开始温度求解
esel，all
time，2
solve
```

10）完成温度求解后，运行如下命令。

```
timint，on，ther    !定义载荷子步与瞬态效应
nsubst，20
```

开启瞬态效应，设置载荷子步为 20 步。继续运行如下命令。

```
esel，s，type，，2
nsle
ddele，all，temp
```

选出单元类型为 2 的单元，并选择属于这些单元的节点，删除这些节点的温度，如

图 9-21 所示。

11）运行如下命令。

```
nsel，all                    !删除温度载荷
esel，s，，，3
nsle
ddele，all，temp
```

选出 3 号单元，再选出属于它的节点，删除其温度，如图 9-22 所示。

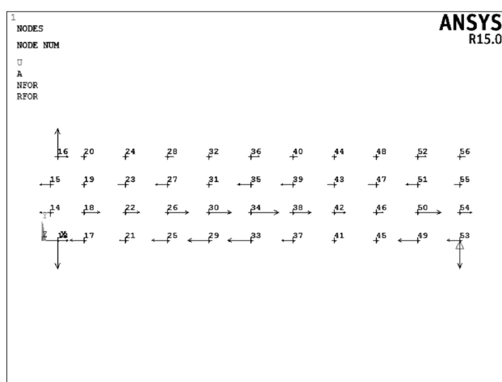


图 9-21　选出的节点

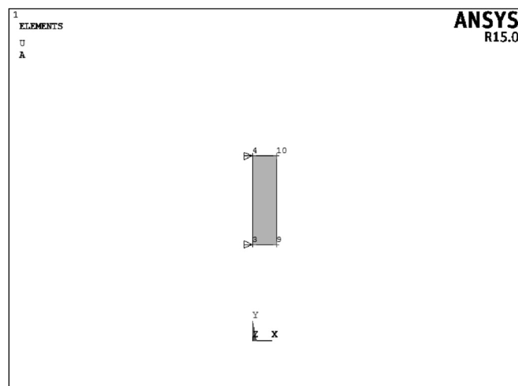


图 9-22　删除 3 号单元的温度

12）运行如下命令。

```
nsel，all                    !激活焊缝
esel，all
ealive，3
ealive，8
```

激活 3 号单元与 8 号单元。此时模型中活单元如图 9-23 所示。逐步激活单元用以模拟焊接过程。

继续运行如下命令。

```
nsel，s，loc，y，0           !施加面载荷
nsel，a，loc，y，1.2
hfval=.00001
sf，all，conv，hfval，100
```

选中模型中 Y=0 与 Y=1.2 的节点，施加面载荷，对流系数为 hfval，体平均温度为 100，如图 9-24 所示。

13）运行如下命令。

```
nsel，all              !设置输出参数并开始求解
time，30
outpr，all，all
```

```
outres, all, all
solve
```

定义第 3 个载荷步，时间为 30，设置输出参数为全部输出，求解。

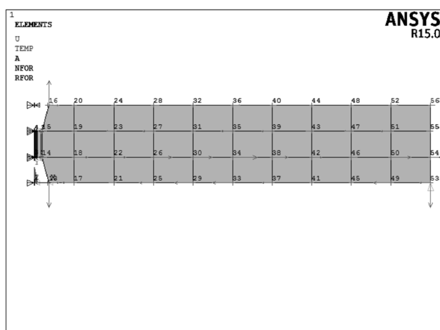


图 9-23 “活单元”

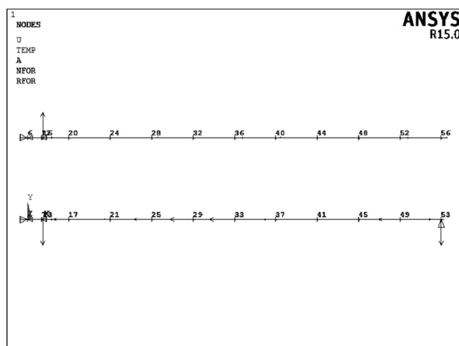


图 9-24 定义对流系数与体温度

14）求解完第 3 个载荷步后运行如下命令。

```
esel, s,,, 1, 3, 2        !删除上一步的载荷
nsle
ddele, all, temp
```

将 1、3、2 号单元上的节点选出，删除其上的温度，如图 9-25 所示。

运行如下命令。

```
nsel, all            !激活下一部分焊缝
esel, s,,, 5
nsle
esln, a
esel, inve
ealive, all
```

此时活单元如图 9-26 所示。

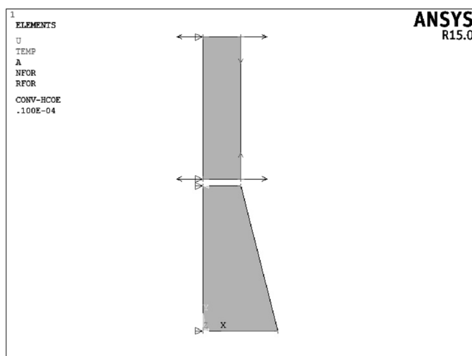


图 9-25 激活焊缝单元

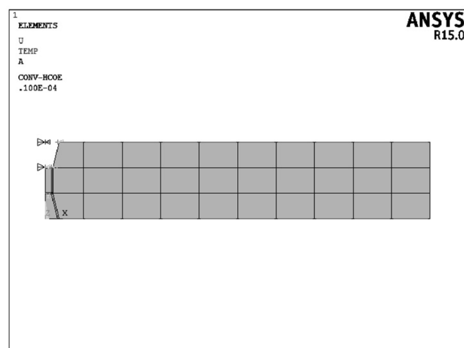


图 9-26 “活”单元

15）运行如下命令，求解第 4 载荷步。

```
nsel，all              !设置载荷输出参数并开始求解
esel，all
time，300
autot，on
deltim，10，5，30
outpr，all，all
outres，all，all
solve
```

设置载荷步的时间为 300，打开自动时间步长，求解。

16）完成第 4 载荷步后，运行如下命令。

```
ddele，all，temp           !删除上一步的载荷
ealive，all                !激活剩余的焊缝
time，600                  !设置输入参数并开始求解
autot，on
deltim，10，5，30
outpr，all，all
outpr，all，all
solve
fini
```

此时，活单元如图 9-27 所示，焊缝已经生成。

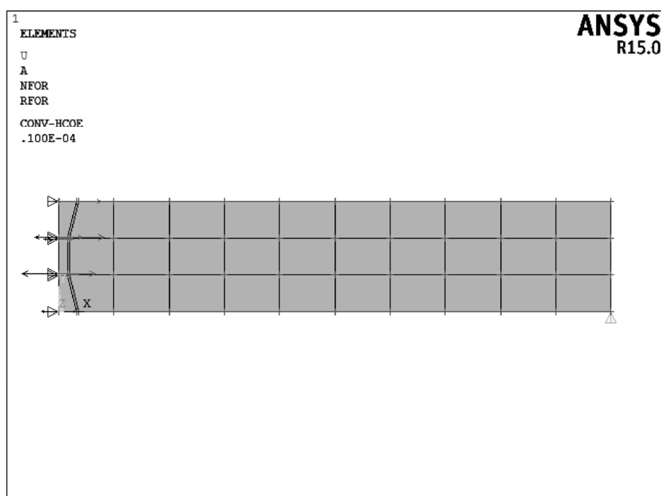


图 9-27　激活全部单元

17）完成求解后，在 GUI 界面中可以查看图形结果。在 GUI 中选择 Main Menu> General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 命令，弹出如图 9-28 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在图 9-28 所示的 Plot Deformed Shape 对话框中选择 Def+undef edge 选项，单击 OK 按

钮，即可在工作区中显示如图 9-29 所示的变形图。也可以在工作区中显示应力分布，如图 9-30 和图 9-31 所示。

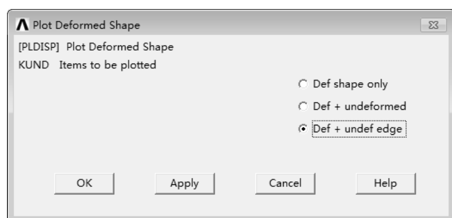


图 9-28 Plot Deformed Shape 对话框

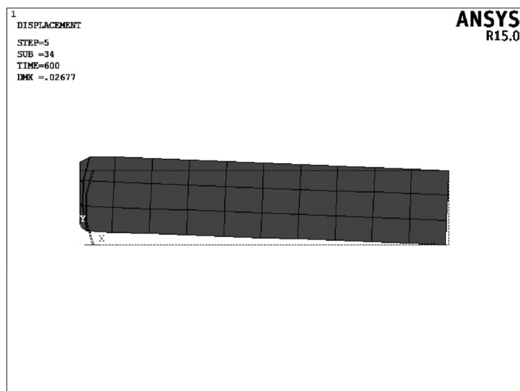


图 9-29 变形图

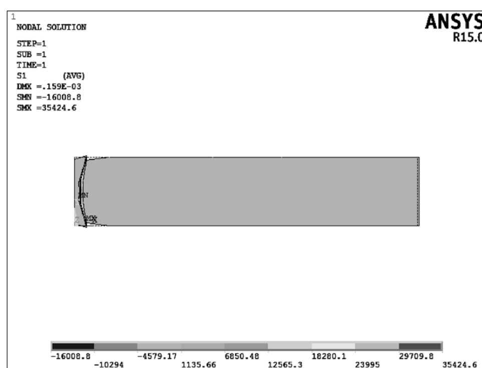


图 9-30 初始应力

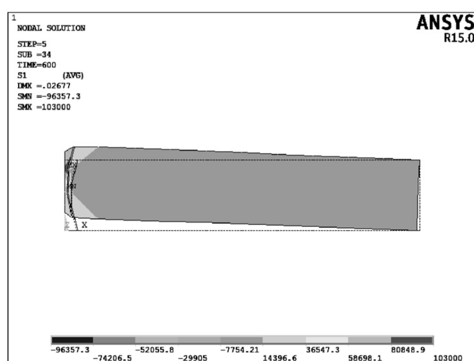


图 9-31 最终应力分布

9.3 铸造过程仿真

ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题，如凝固或熔化等。含有相变问题的热分析是一个非线性的瞬态问题。

9.3.1 概述

相变问题需要考虑熔融潜热，即在相变过程吸收或释放的热量。ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑熔融潜热（见图 9-32）。

焓的单位是 $1/m^3$，是密度与比热的乘积对温度的积分：

$$H = \int \rho C(T) \mathrm{d}T$$

求解相变问题，应当设定足够小的时间步长，并将自动时间步长设置为 ON。

选用低阶的热单元，例如 PLANE55 或 SOLID70。如果必须选用高阶单元，单元选项 KEYOPT（1）设置为 1。

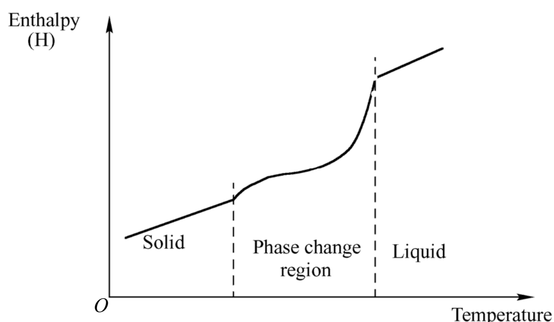


图 9-32　焓-温度曲线

APDL 命令：keyopt（1）=1。

GUI 界面操作：MainMenu>Prepocessor>ElementType> Add/Edit/Delete> Options> Specific heat matrix>Diagonalized。

在设定瞬态积分参数时，THETA 值设置为 1（默认为 0.5）。

APDL 命令：TINTP。

GUI 界面操作：Main Menu> Solution> Load and Step Opts> Time/Frequence> Time intergration> THETA。

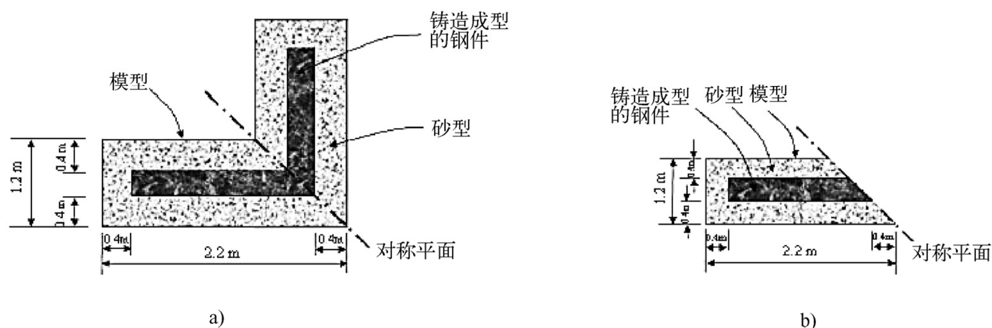
线性搜索将有助于加速相变问题的求解。

APDL 命令：LNSRCH。

GUI 界面操作：Main Menu> Solution> Load and Step Opts> Nonlinear> Line Search。

9.3.2 分析过程

钢铸件及其砂模的横截面尺寸如图 9-33 所示。



a)　　　　　　　　b)

图 9-33　几何尺寸

a) 问题描述　b) 根据对称性确定计算模型

型砂的热物理性能如表 9-3 所示。

表 9-3 型砂物理性能

	单 位 制	
导热系数（KXX）	Btu/hr.in.oF	0.025
密度（DENS）	lbm/in3	0.254
比热（C）	Btu/lbm.oF	0.28

铸钢的热物理性能如表 9-4 所示。

表 9-4 铸钢热物理性能

	单 位 制	0oF	2643oF	2750oF	2875oF
导热系数	Btu/hr.in.oF	1.44	1.54	1.22	1.22
焓	Btu/in3	0	128.1	163.8	174.2

铸钢的初始温度为 2875^{o}F，砂模的初始温度为 80^{o}F；砂模外边界对流系数 0.014Btu/hr.in^{2}.^{o}F，空气温度 80^{o}F；求 3h 后铸钢及砂模的温度分布。

启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。

在 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 中输入工作目录名称，在 Job Name 输入项目名称 9-3。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete 命令，弹出图 9-34 所示的 Element Types 对话框。

单击 Add 按钮，弹出图 9-35 所示的 Library of Element Types 对话框。在 Library of Element Types 对话框中选择单元类型为 PLANE77，单击 OK 按钮。

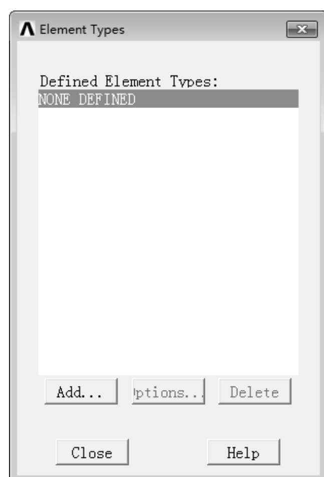


图 9-34 Element Types 对话框

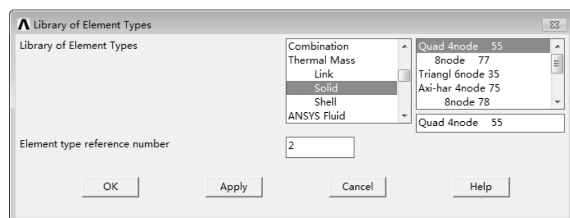


图 9-35 Library of Element Types 对话框

此时回到 Element Types 对话框中即可看到添加完成的单元。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models 命令，弹

出如图 9-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

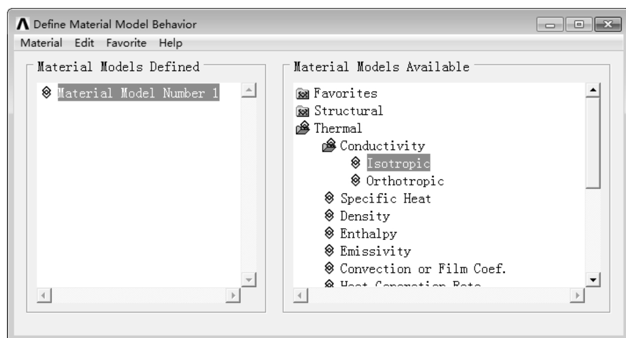
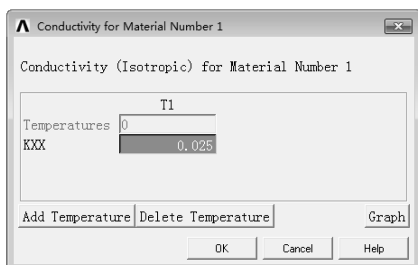


图 9-36 Define Material Model Behavior 对话框

选择材料模型 Thermal>Conductivity>Isotropic，弹出图 9-37 所示的 Conductivity for Material Number 1 对话框，输入 KXX=0.025，单击 OK 按钮完成。

回到图 9-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择 Thermal> Density，弹出图 9-38 所示的 Density for Material Number 1 对话框，输入 DENS=0.054，单击 OK 按钮完成。



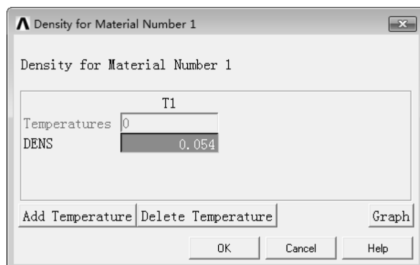


图 9-37 Conductivity for Material Number 1 对话框（一） 图 9-38 Density for Material Number 1 对话框（二）

回到图 9-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择 Thermal>Specific Heat，弹出图 9-39 所示的 Specific Heat for Material Number 1 对话框，输入 C=0.28，单击 OK 按钮完成。

回到图 9-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择 Material>New Model，弹出图 9-40 所示的 Define Material ID 对话框，输入材料编号 2。

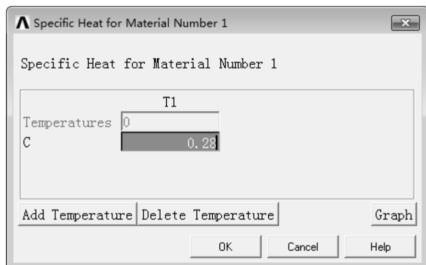


图 9-39 Specific Heat for Material Number 1 对话框

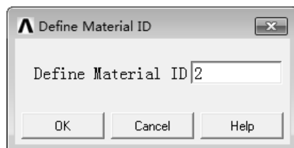


图 9-40 Define Material ID 对话框

在图 9-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Thermal> Conductivity> Isotropic，弹出图 9-41 所示的 Conductivity for Material Number 2 对话框。

单击 Add Temperatures 按钮，添加两个温度输入框，在框中输入温度值与对应的导热系数值，如图 9-41 所示。

在图 9-36 所示的 Define Material Model Behavior 对话框中选择 Thermal> Enthalpy，弹出图 9-42 所示的 Enthalpy for Material Number 2 对话框。

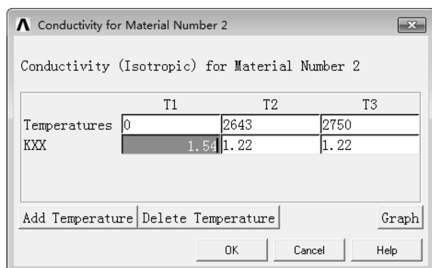


图 9-41 Conductivity for Material Number 2 对话框

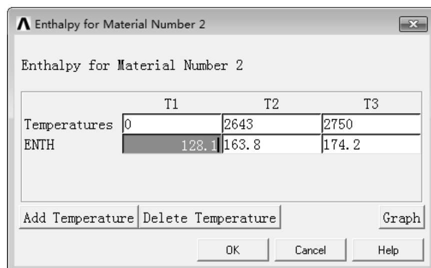


图 9-42 Enthalpy for Material Number 2 对话框

单击“Add Temperature”按钮，添加两个温度输入框，在框中输入温度值与对应的焓值，如图 9-42 所示。

完成材料定义，1 号材料为型砂，2 号材料为铸钢。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Plot>Materials 命令，弹出图 9-43 所示的 Graph Material Properties 对话框。

选择 The conductivity>KXX，输入材料编号 2，单击 OK 按钮，在工作区中显示导热系数-温度曲线，如图 9-44 如示。

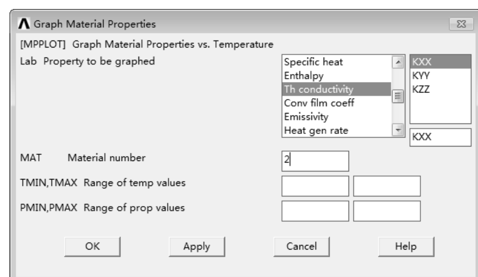


图 9-43 Graph Material Properties 对话框

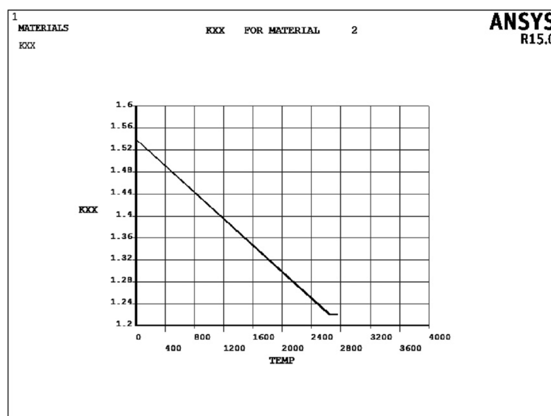


图 9-44 导热系数-温度曲线

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Plot>Materials 命令，弹出图 9-45 所示的 Graph Material Properties 对话框。

选择 Enthalpy，输入材料编号 2，单击 OK 按钮，在工作区中显示焓-温度曲线，如图 9-46 如示。

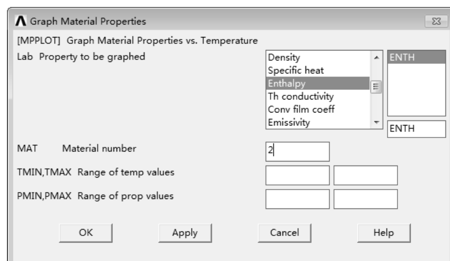


图 9-45 Graph Material Properties 对话框

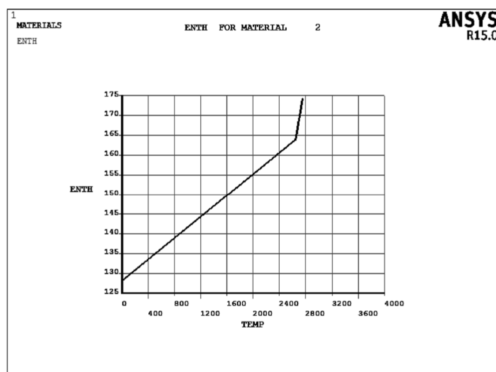


图 9-46 焓-温度曲线

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，弹出图 9-47 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框。

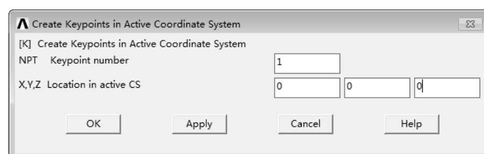


图 9-47 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

在 NPT 输入框中输入关键点编号 1，在 X、Y、Z 输入框中输入 1 号关键点的坐标值如图 9-47 所示，单击 Apply 按钮确认并继续输入下一个关键点坐标，直至完成表 9-5 所示的所有关键点的定义。

表 9-5 关键点坐标

关 键 点 号	X	Y	X
1	0	0	0
2	22	0	0
3	10	12	0
4	0	12	0

完成定义的关键点如图 9-48 所示。

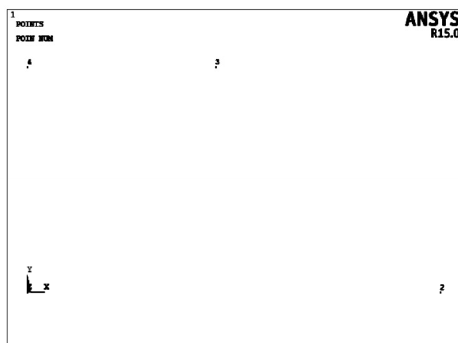


图 9-48 完成定义的关键点

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Arbitrary> Through KPs 命令，弹出图 9-49 所示的 Create Area thru KPs 对话框，输入关键点编号

1,2,3,4，用英文逗号隔开，单击 OK 按钮，生成面，如图 9-50 所示。

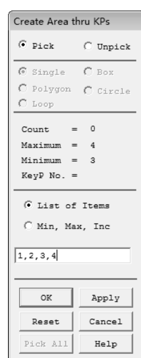


图 9-49　Create Area thru KPs 对话框

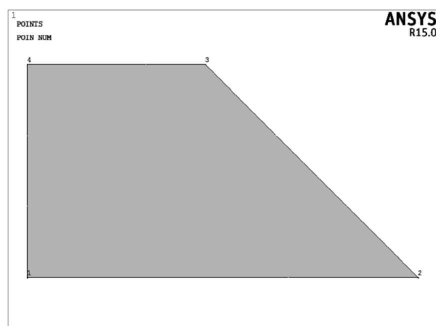


图 9-50　通过连接关键点生成面

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Rectangle> By Dimensions 命令，弹出图 9-51 所示的 Create Rectangle by Dimensions 对话框，输入矩形的两个角点坐标如图 9-51 所示。

单击 OK 按钮，在工作区中生成矩形，如图 9-52 所示。

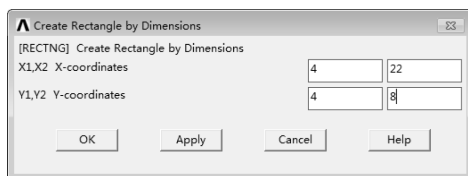


图 9-51　Create Rectangle by Dimensions 对话框

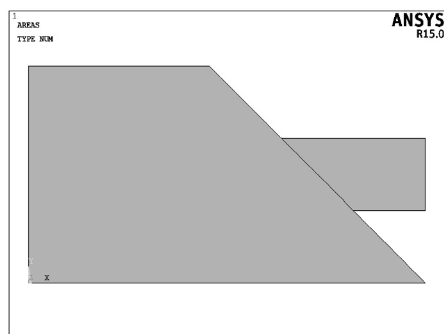


图 9-52　生成矩形

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate>Booleans> Overlap> Areas 命令，弹出 Overlap Areas 对话框，单击 Pick All 按钮，两个面搭接如图 9-53 所示。

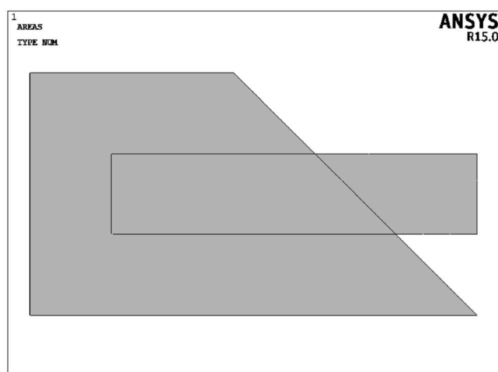


图 9-53　搭接

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls> Numbering 命令，弹出图 9-54 所示的 Plot Numbering Controls 对话框，设置如图 9-54 所示，单击 OK 按钮完成。

此时工作区中的显示应为图 9-55 所示。

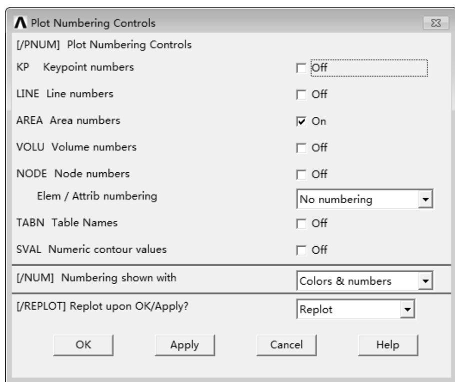


图 9-54 Plot Numbering Controls 对话框

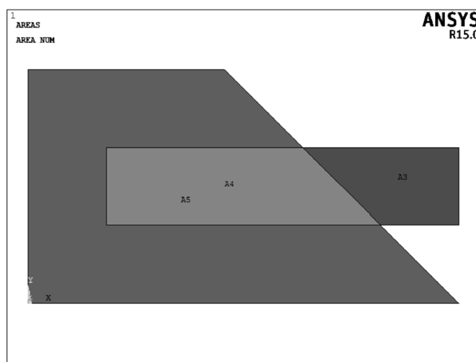


图 9-55 显示面编号

在 GUI 界面选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Delete> Area and Below 命令，弹出 Delete Area and Below 对话框，在工作区中拾取 3 号面，单击 OK 按钮。结果如图 9-56 所示。

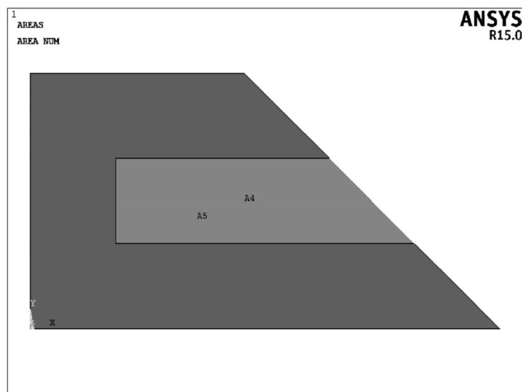


图 9-56 删除 3 号面

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Size Cntrls>ManualSize> Global> Size 命令，弹出图 9-57 所示的 Global Element Sizes 对话框，设置单元尺寸为 1，如图 9-57 所示，单击 OK 按钮完成。

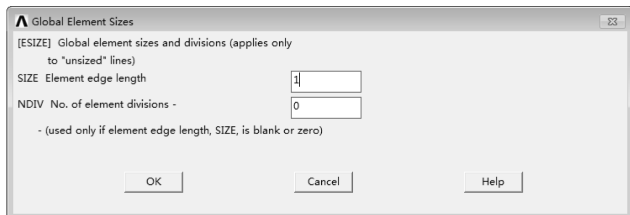


图 9-57 Global Element Sizes 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Areas> Mapped> 3 or 4 sided 命令，弹出 Mesh Areas 对话框。

在工作区中拾取 5 号面，单击 OK 按钮，完成 5 号面的网格划分，如图 9-58 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh Attributes> Default Attribs 命令，弹出图 9-59 所示的 Meshing Attributes 对话框。

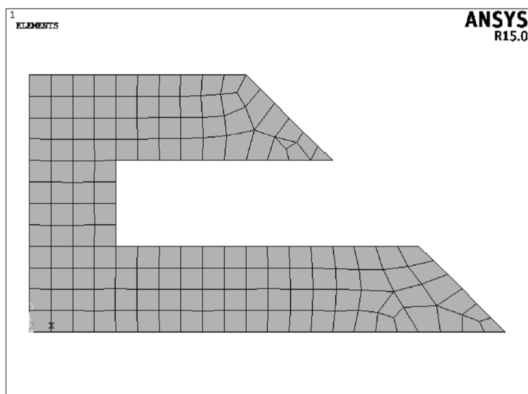


图 9-58 划分 5 号面的网格

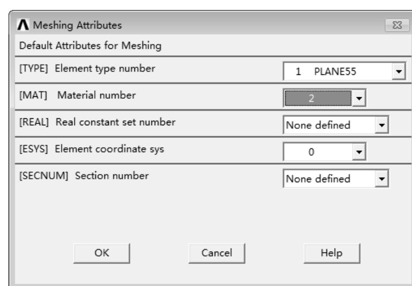


图 9-59 Meshing Attributes 对话框

将 MAT（材料编号）设置为 2，单击 OK 按钮完成。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Areas> Mapped> 3 or 4 sided 命令，弹出 Mesh Areas 对话框。选择 4 号面，单击 OK 按钮，完成面的划分如图 9-60 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Analysis Type> New Analysis 命令，弹出图 9-61 所示的 New Analysis 对话框，设置分析类型为 Transient，即瞬态分析。

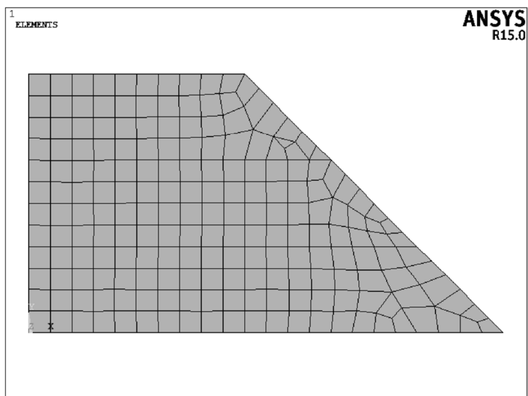


图 9-60 完成网格划分

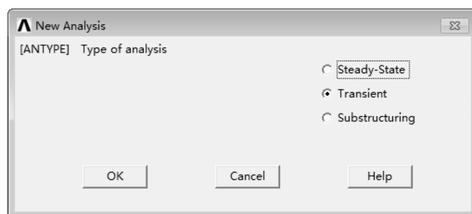
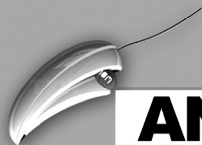


图 9-61 New Analysis 对话框

在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，弹出 Select Entities 对话框，设置选择参数如图 9-62 所示，选出材料为 2 的单元，如图 9-63 所示。



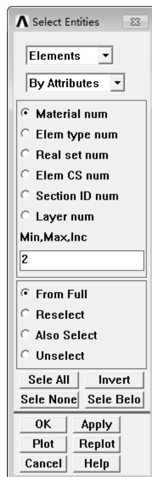


图 9-62 Select Entities 对话框

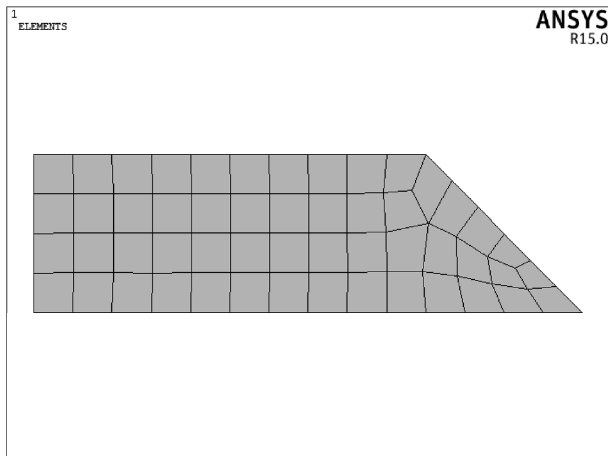


图 9-63 选中铸钢单元

将 Select Entities 对话框中的参数设置如图 9-64 所示，单击 OK 按钮，选中的节点如图 9-65 所示。

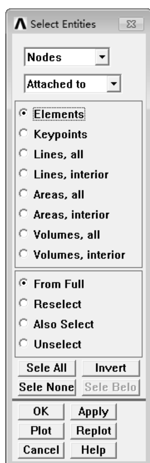


图 9-64 Select Entities 对话框

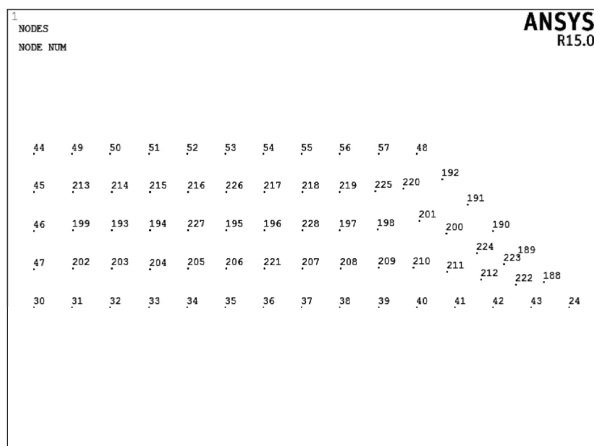


图 9-65 选中铸钢单元的节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Initial Condit'n> Define 命令，弹出 Define Initial Conditions 对话框。

单击 Pick All 按钮，弹出图 9-66 所示的 Define Initial Conditions 对话框，设置初始条件为 TEMP，值为 2875。

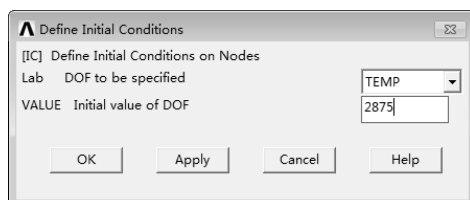


图 9-66 Define Initial Conditions 对话框

在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，弹出图 9-67 所示的 Select Entities 对话框，设置选择参数如图 9-67 所示，单击 Invert 按钮，反选出其余单元，如图 9-68 所示。



图 9-67 Select Entities 对话框

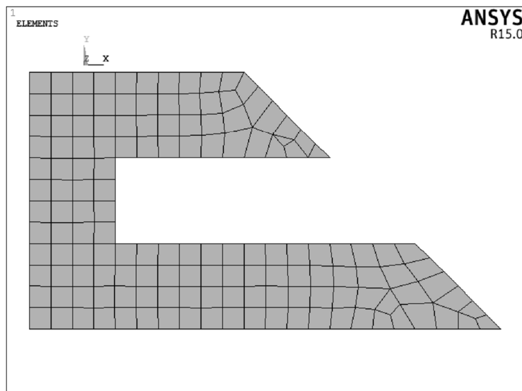


图 9-68 选中铸钢单元

将 Select Entities 对话框中的参数设置为图 9-69 所示，单击 OK 按钮，选中的节点如图 9-70 所示。

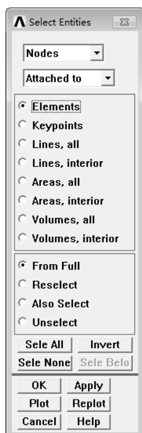


图 9-69 Select Entities 对话框

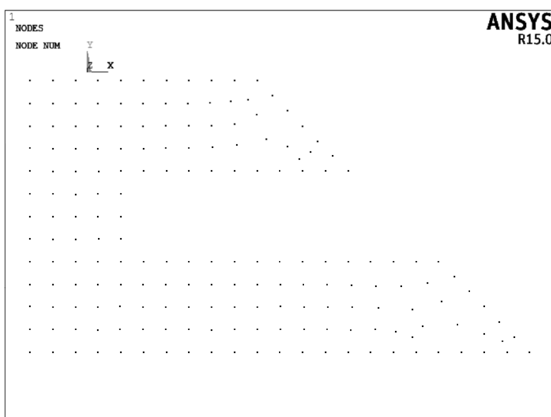


图 9-70 选中铸钢单元的节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Initial Condit'n> Define 命令，弹出 Define Initial Conditions 对话框。

单击 Pick All，弹出图 9-71 所示的 Define Initial Conditions 对话框，设置初始条件为 All DOF，值为 80。

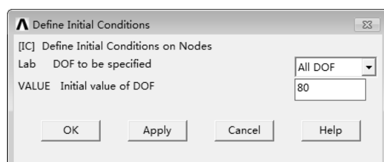


图 9-71 Define Initial Conditions 对话框

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Plot> Lines 命令，在工作区中绘出线框模型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Thermal> Convection> On Lines，在工作区中拾取模型外缘 3 条线如图 9-72 所示，单击 OK 按钮，弹出图 9-73 所示的 Apply CONV on lines 对话框。

设置热传导系数为 0.014，总体温度为 80，如图 9-73 所示，单击 OK 按钮完成边界条件设置，如图 9-74 所示。

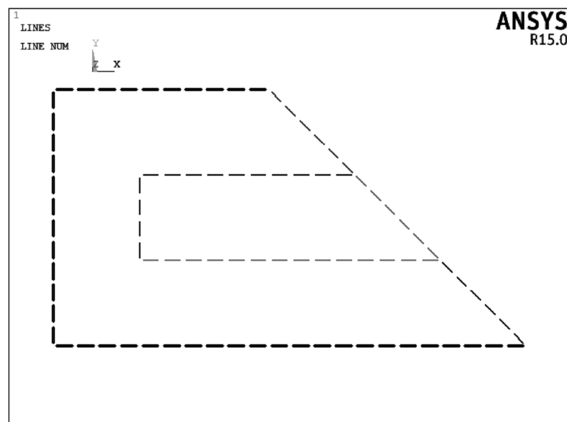


图 9-72　选中砂模的外缘

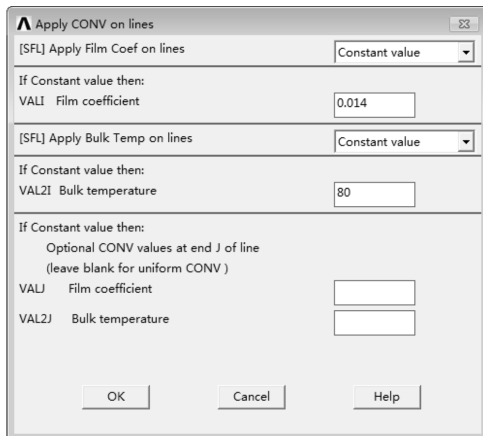


图 9-73　Apply CONV on lines 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Analysis Type> Sol'n Controls 命令，弹出图 9-75 所示的 Solution Controls 对话，设置 Basic 选项卡如图 9-75 所示。

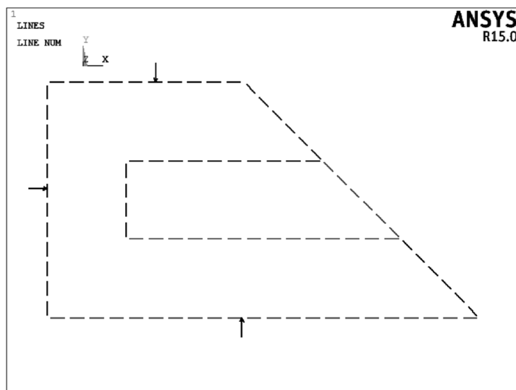


图 9-74　完成边界条件设置

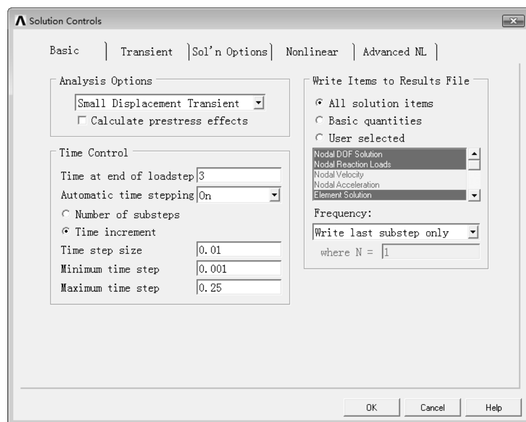


图 9-75　Solution Controls 对话框（Basic 选项卡）

进入 Transient 选项卡，将加载方式设置为 Stepped loading，如图 9-76 所示，单击 OK 按钮完成。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Load Step Opts> Output Ctrls> DB/Results File 命令，弹出图 9-77 所示的 Controls for Database and Results Files Writing 对话框。

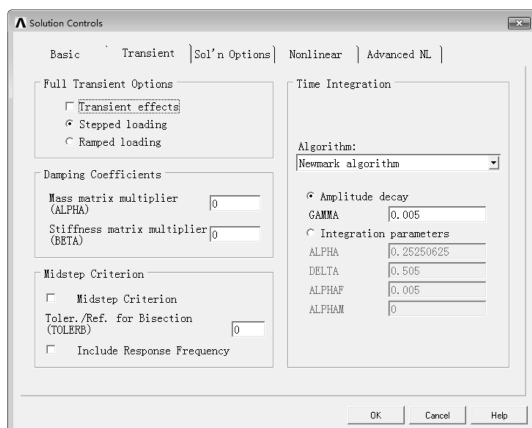


图 9-76　Solution Controls 对话框

（Transient 选项卡）

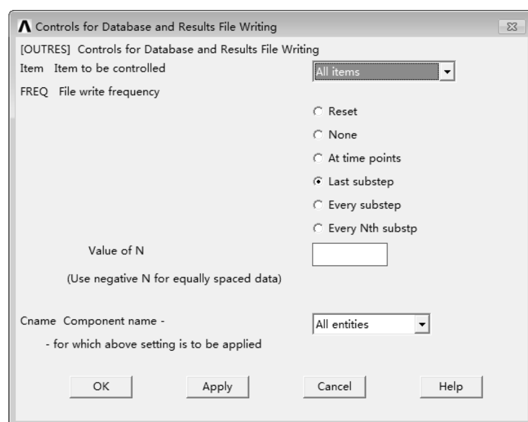


图 9-77　Controls for Database and Results Files Writing 对话框

设置 Item to be controlled（输出参数的控制对象）为 All items，设置输出为 All entities（全部输出），如图 9-77 所示，单击 OK 按钮完成。

在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 9-78 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 9-79 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

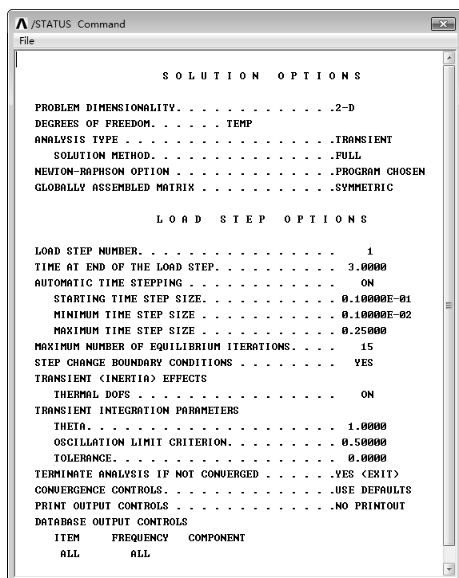


图 9-78　STATUS Command 窗口

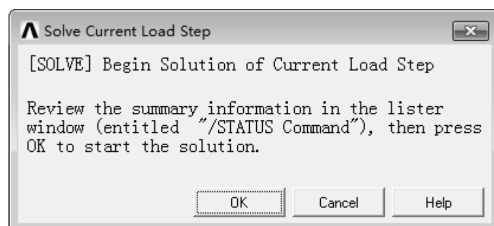


图 9-79　Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。

求解过程中，工作区随时间进程绘出如图 9-80 所示的绝对收敛范数-累积迭代次数曲线。曲线显示了 ANSYS 求解状态。完成求解后即可以进行后处理。

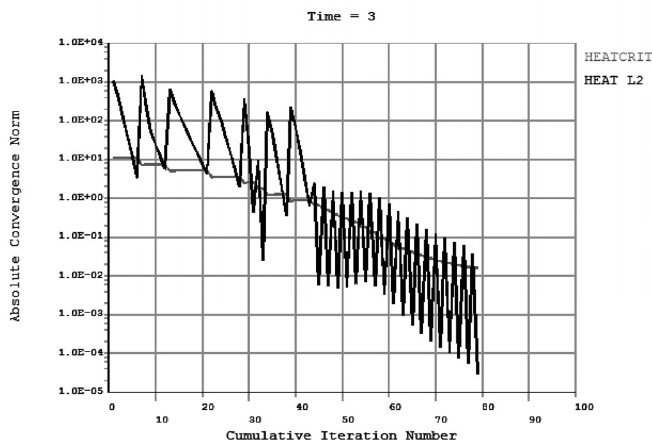


图 9-80　绝对收敛范数-累积迭代次数曲线

进入时间历程后处理器（/POST26），弹出如图 9-81 所示的 Time History Variables 对话框。

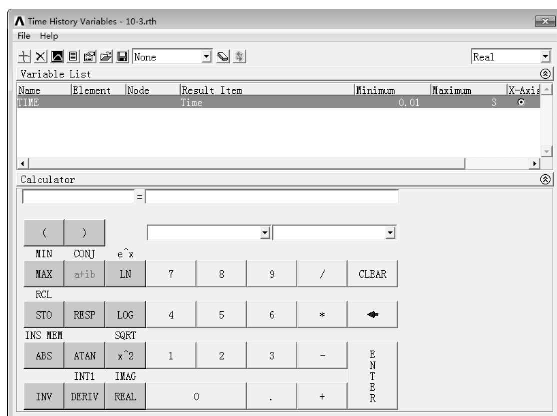


图 9-81　Time History Variables 对话框

单击“添加变量”按钮，弹出图 9-82 所示的 Add Time-History Variable 对话框。

单击 OK 按钮，弹出图 9-83 所示的 Node for Data 对话框，输入节点号 204，这是位于铸钢中心的一个节点。单击 OK 按钮，完成变量添加。

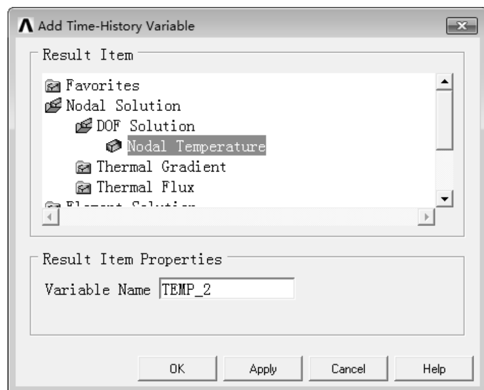


图 9-82　Add Time-History Variable 对话框

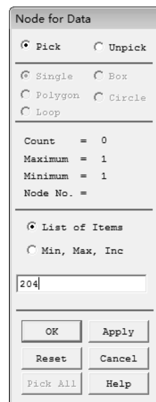


图 9-83　Node for Data 对话框

单击 Time History Variables 对话框中的“绘曲线”按钮，在工作区中绘出的曲线如图 9-84 所示。

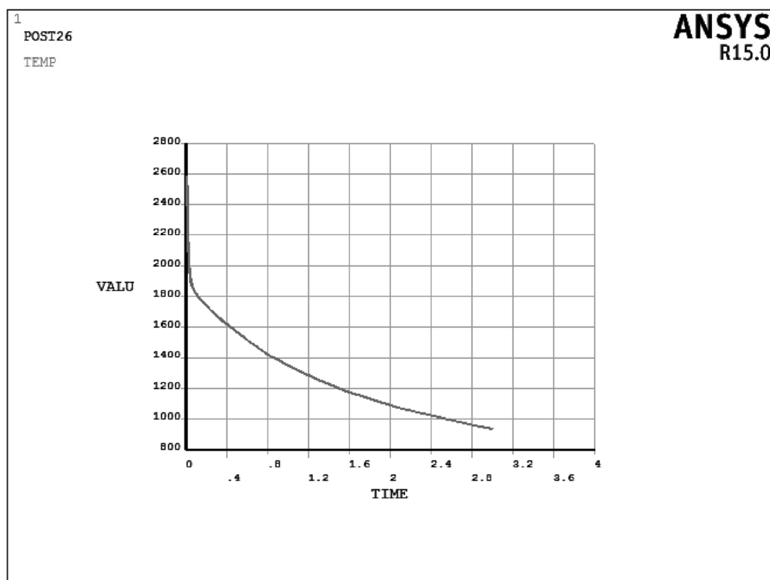


图 9-84　节点 204 的温度-时间曲线

单击工具栏中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框。

选择 Save Everything 选项，保存所有项目，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

9.4　热-结构耦合问题

热-结构耦合问题是结构分析中通常遇到的一类耦合分析问题。由于结构温度场的分布不均会引起结构的热应力，或者结构部件在高温环境中工作，材料受到温度的影响会发生性能的改变，这些都是进行结构分析时需要考虑的因素。为此需要先进行相应的热分析，然后在进行结构分析。热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度、热流密度（热通量）等。本节主要介绍在 ANSYS 中进行热-结构耦合分析。

9.4.1 概述

在 ANSYS 中能够进行的热耦合分析有：热-结构耦合、热-流体耦合、热-电耦合、热-磁耦合、热-电-磁-结构耦合等，因为本书主要讲解结构实例分析，所以着重讲解热-结构耦合分析。在 ANSYS 中通常可以用两种方法来进行耦合分析，一种是顺序耦合方法，另一种是直接耦合方法。

顺序耦合方法包括两个或多个按一定顺序排列的分析，每一种属于某一物理分析。通过将前一个分析的结果作为载荷施加到下一个分析中的方式进行耦合。典型的例子就是热-应

力顺利耦合分析，热分析中得到节点温度作为“体载荷”施加到随后的结构分析中去。

直接耦合方法只包含一个分析，它使用包含多场自由度的耦合单元。通过计算包含所需物理量的单元矩阵或载荷向量矩阵或载荷向量的方式进行耦合。典型的例子是使用SOLID45、PLANE13 或 SOLID98 单元的压电分析。

进行顺序耦合场分析可以使用间接法和物理环境法。对于间接法，使用不同的数据库和结果文件，每个数据库包含合适的实体模型、单元、载荷等。可以把一个结果文件读入到另一个数据库中，但单元和节点数量编号在数据库和结果文件中必须是相同的。物理环境方法的整个模型使用一个数据库。数据库中必须包含所有的物理分析所需的节点和单元。对于每个单元或实体模型图元，必须定义一套属性编号，包括单元类型号、材料编号、实常数编号及单元坐标编号。所有这些编号在所有物理分析中是不变的。

9.4.2 分析过程

本例将分析一个双层金属片。

如图 9-85 所示，双层金属片由两种不同性质的材料牢固地粘接在一起，材料 1 与材料 2 的物理性质如表 9-6 所示。

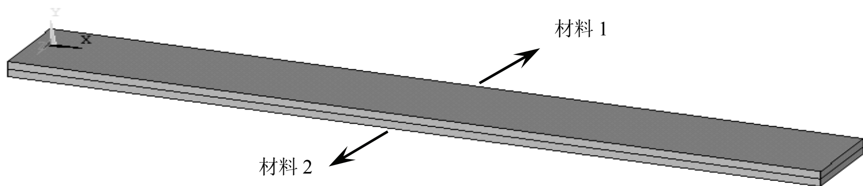


图 9-85　几何模型示意图

表 9-6　材料参数

材料 1	弹性模量	2.00E+11
	泊松比	0.3
	线膨胀系数	1.00E-05
材料 2	弹性模量	1.10E+11
	泊松比	0.34
	线膨胀系数	1.60E-05

金属片左端固定，分析金属片在 100℃时的形变。

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。在 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 中输入工作目录名称，在 Job Name 输入项目名称 9-4。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

2）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete 命令，单击 Add 按钮，选择单元类型为 SOLID186，如图 9-86 所示。

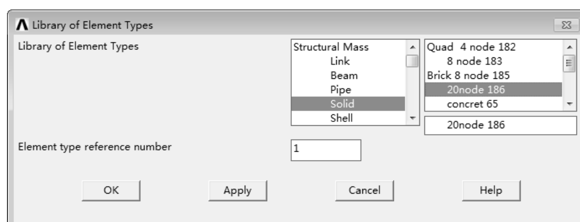


图 9-86 Library of Element Types 对话框

3）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models 命令，弹出图 9-87 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为 Thermal Expansion> Secant Coefficient> Isotropic。

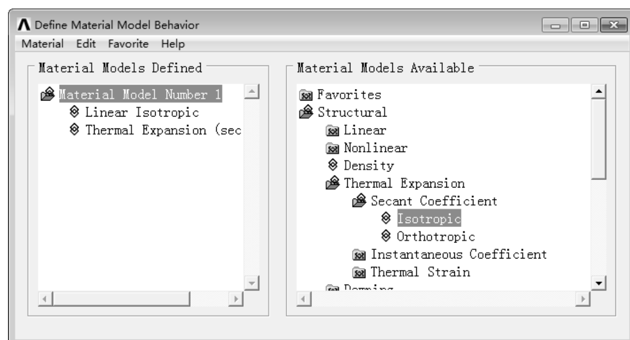


图 9-87 Define Material Model Behavior 对话框

在弹出的 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框中，设置材料 1 的线膨胀系数，如图 9-88 所示。

在 Thermal Expansion Secant Coefficient for Material Number 1 对话框中还可以设置材料的 Reference temperature（参考温度），在本例中可以直接在此设置参考温度为 0，也可以在完成加载后统一设置参考温度为 0。

回到图 9-87 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型 Structural> Linear> Elastic> Isotropic，定义各向同性弹性材料参数，如图 9-89 所示。

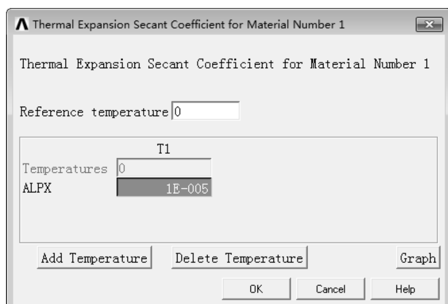


图 9-88 材料 1 的线膨胀系数

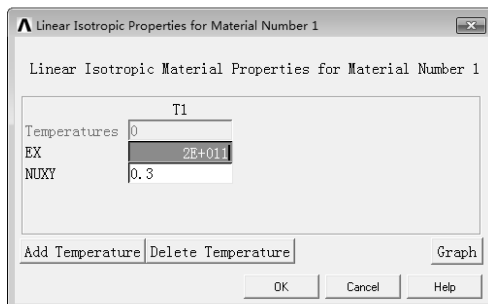


图 9-89 材料 1 的强度参数

重复上述操作，完成材料 2 的参数定义。材料 2 的参数见表 9-6。

4）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Block> By Dimensions 命令，弹出图 9-90 所示的 Create Block by Dimensions 对话框。

输入第一个长方体的两个角点坐标，如图 9-90 所示。单击 Apply 按钮，生成第一个长方体，如图 9-91 所示。

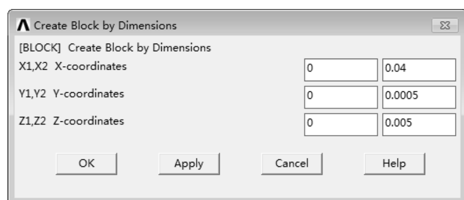


图 9-90　Create Block by Dimensions 对话框

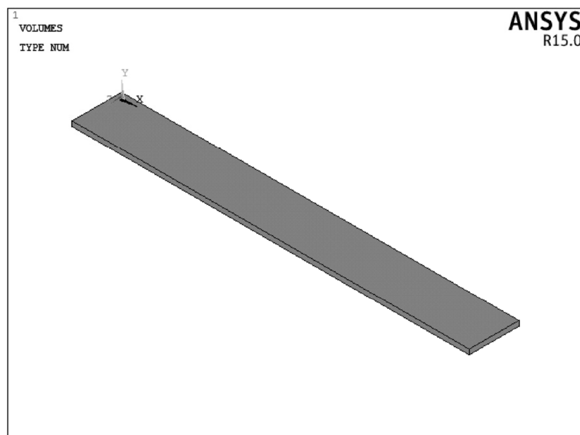


图 9-91　生成第一个长方体

继续输入第二个长方体的参数如下。

X1=0，X2=0.04

Y1=0.0005，Y2=0.001

Z1=0，Z2=0.005

单击 OK 按钮完成模型建立，如图 9-92 所示。

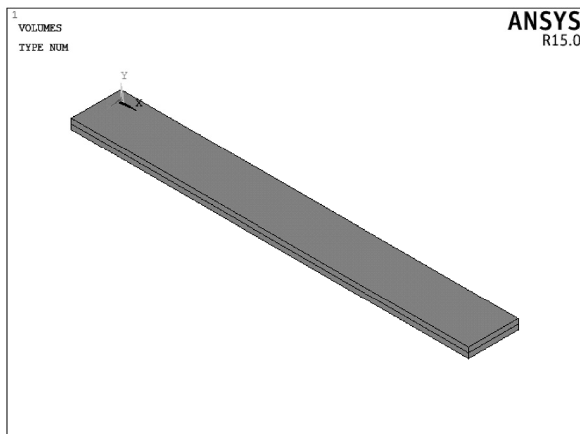


图 9-92　完成几何模型

5）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate>Booleans> Glue> Volumes 命令，在弹出的拾取框中单击 Pick All 按钮，将两个体粘接在一起。

6）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Size Cntrls>ManualSize> Global>Size 命令，弹出图 9-93 所示的 Global Element Sizes 对话框，设置单元尺寸为 0.0005。

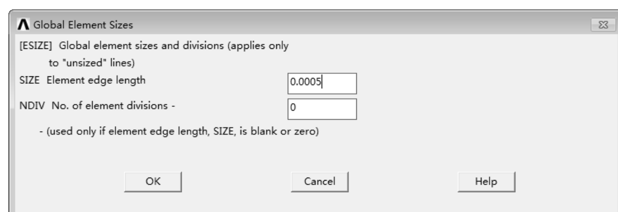


图 9-93 Global Element Sizes 对话框

7）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh Attributes>Default Attributes 命令，输入体编号 1，单击 OK 按钮，弹出图 9-94 所示的 Volume Attributes 对话框。

设置材料编号为 1，单击 OK 按钮。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Volumes> Mapped> 4 to 6 sided 命令，输入体编号 1，单击 OK 按钮，完成 1 号体的划分，如图 9-95 所示。

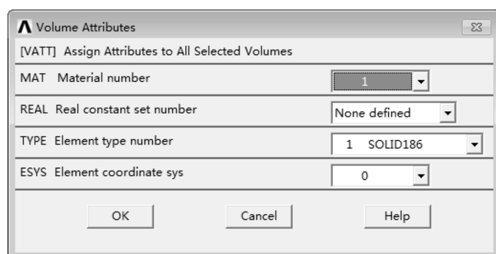


图 9-94 Volume Attributes 对话框

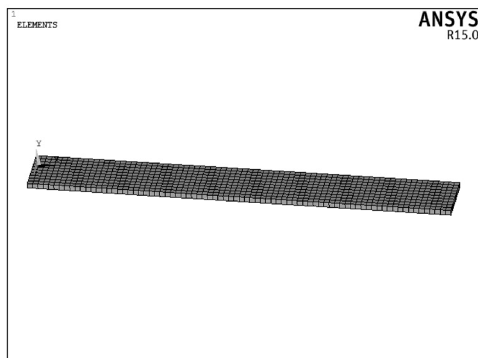


图 9-95 1 号体划分

8）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh Attributes>Default Attributes 命令，输入体编号 2，单击 OK 按钮，在 Volume Attributes 对话框中设置材料编号为 2。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Volumes> Mapped> 4 to 6 sided 命令，输入体编号 2，完成网格划分的模型如图 9-96 所示。

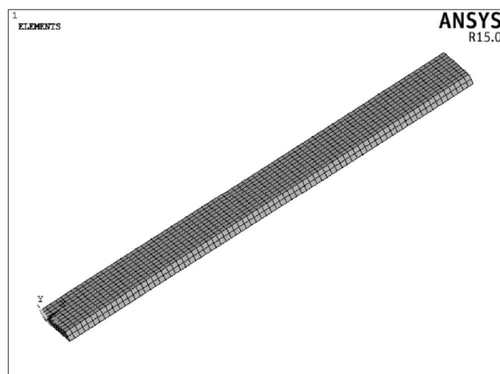


图 9-96 完成网格划分

9）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Plot Ctrls> Numbering 命令，弹出图 9-97 所示的 Plot Numbering Controls 对话框。

勾选 AREA Area numbers，单击 OK 按钮，在工作区中显示面编号，如图 9-98 所示。

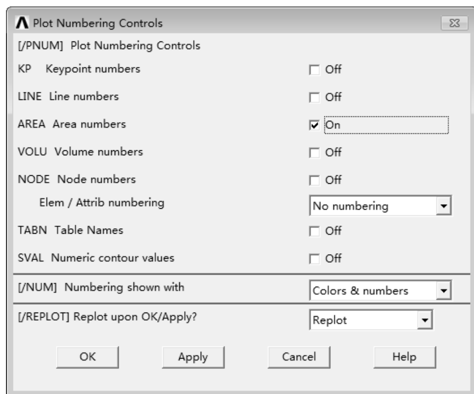


图 9-97　Plot Numbering Controls 对话框

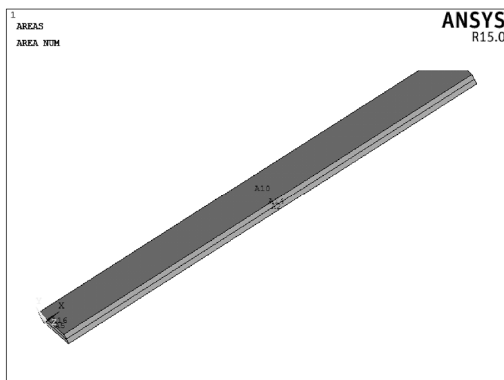


图 9-98　显示面编号

10）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement> On Areas 命令，弹出 Apply U，ROT on Areas 对话框。

在 Apply U，ROT on Areas 对话框输入面编号 5，单击 OK 按钮，弹出图 9-99 所示的 Apply U，ROT on Areas 对话框。设置要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮完成。

重复上述操作，约束 16 号面的全部自由度。完成的自由度约束如图 9-100 所示。

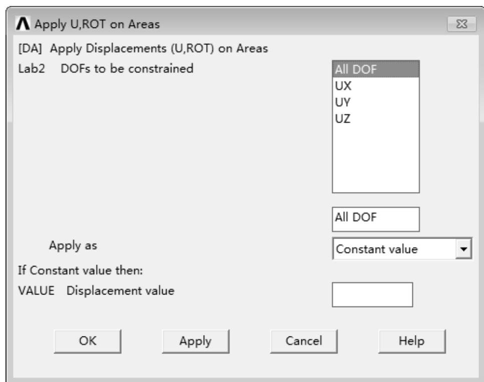


图 9-99　Apply U，ROT on Areas 对话框

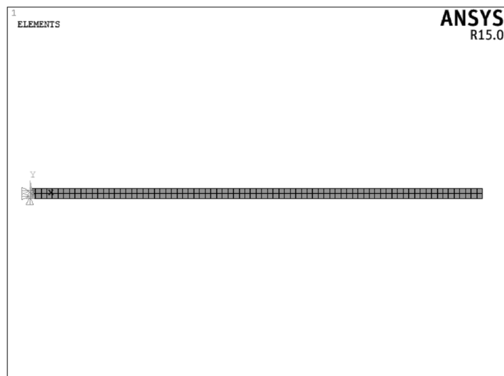


图 9-100　完成约束

11）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply>Structural> Temperature> On Volumes 命令，单击 Pick All 按钮，弹出图 9-101 所示的 Apply TEMP on Volumes 对话框。

输入温度值 100，单击 OK 按钮，完成载荷定义。

12）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Settings> Reference Temp 命令，弹出图 9-102 所示的 Reference Temperature 对话框，设置参考温度为 0，单击 OK 按钮完成。如在定义材料的时候已经定义参考温度，则本步骤应省略不做。

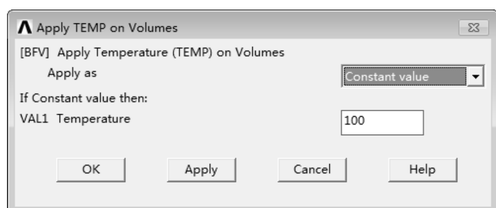


图 9-101　Apply TEMP on Volumes 对话框

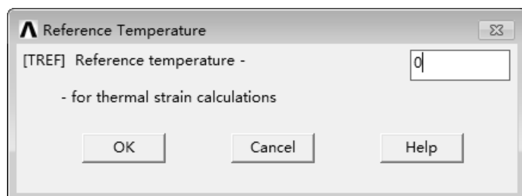


图 9-102　Reference Temperature 对话框

13）在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 9-103 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 9-104 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

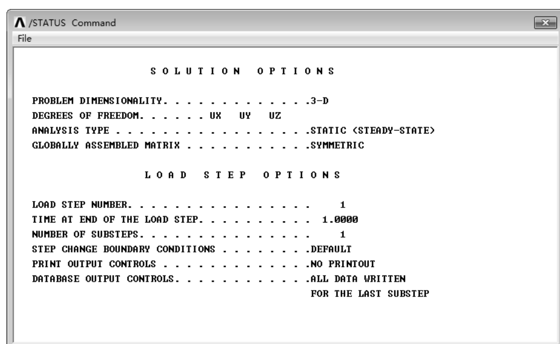


图 9-103　STATUS Command 窗口



图 9-104　Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。

完成求解即可以进入后处理。

14）在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 9-105 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框，选择 Body Temperatures，单击 OK 按钮，在工作区中绘出如图 9-106 所示的温度云图。

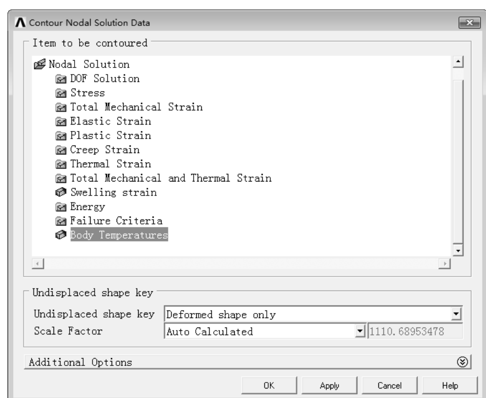


图 9-105　Contour Nodal Solution Data 对话框

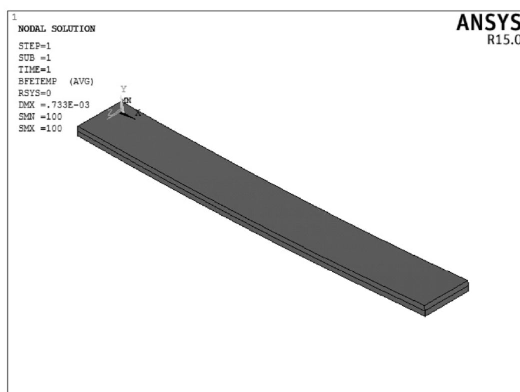


图 9-106　温度云图

在图 9-105 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框中选择 DOF Solution，可以查看位移云图如图 9-107 所示。

在图 9-105 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框中选择 von Misses> 1st Principle stress，可以查看节点应力，如图 9-108 所示。

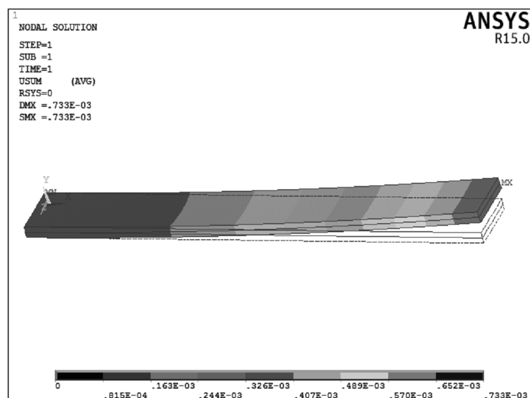


图 9-107　节点位移云图

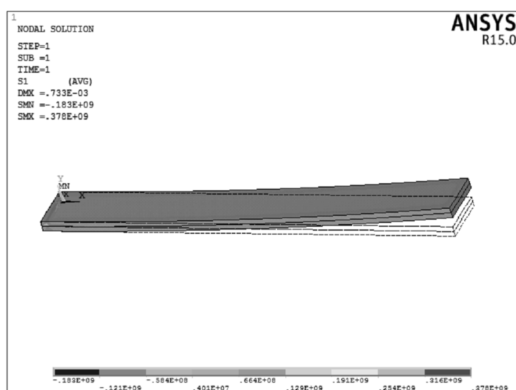


图 9-108　节点应力

单击工具栏中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框。选择 Save Everything，保存所有项目，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

9.5　本章小结

热力学分析问题是 ANSYS 的一个重要应用领域，不仅在机械工程分析中有大量应用，在土木工程领域也有广泛用途。

本章以机械工程领域的实例为引，读者可举一反三，学习进行热分析、耦合场分析的方法，在实际分析中灵活运用。

本章为读者介绍了典型的热分析应用场合，并详细介绍了较为经典的相变问题的分析，读者参考本书的介绍，可以自己动手编写工程实际问题的分析程序进行分析。

第 10 章　装配与复合材料分析

装配是进行机械加工的重要过程，良好的装配精度才能保证各工件的精确配合，否则，无论多高的材料强度、多高的加工精度都是枉然。

复合材料是现代材料技术的结晶，不同材料以合理方式复合，取长补短，使材料的性能得到更为充分地发挥。

装配问题与复合材料等特殊的材料特性，在分析时表现出显著非线性，在 ANSYS 中强大的非线性分析功能能够对这一类问题进行详细仿真与分析。

本章学习目标

- 了解非线性分析的概念。
- 了解非线性分析的基础知识。
- 掌握解决几何非线性问题的方法。
- 掌握大应变问题分析方法。
- 掌握材料非线性分析的方法。

10.1　非线性问题概述

在日常生活中，经常会遇到结构非线性。例如，当用钉书针装钉书时，金属钉书针将永久地弯曲成一个不同的形状。如果在一个木架上放置重物，随着时间的推移木架将越来越下垂。当在汽车或卡车上装载货物时，它的轮胎和下面路面间接触面将随货物重量而变化。如果将上述例子的载荷变形曲线画出来（见图 10-1），将发现它们都显示了非线性结构的基本特征——结构刚度改变。

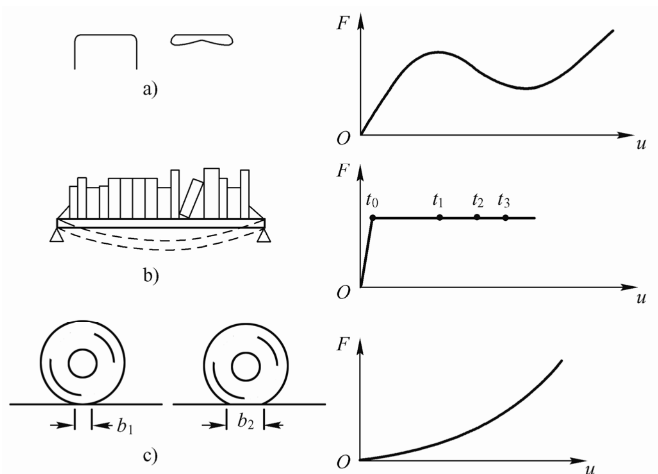


图 10-1　非线性问题示意图

10.1.1 非线性分析基础知识

（1）弹性材料与塑性材料

理想弹性材料物体发生弹性变形时，应力与应变完全呈线性关系，并可假定它从弹性变形过渡到塑性变形是突然的。

理想塑性材料（又称全塑性材料）是发生塑性变形时不产生硬化的材料，这种材料在进入塑性状态之后，应力不再增加，也即在中性载荷时即可连续产生塑性变形。

理想弹塑性材料在塑性变形时，需要考虑塑性变形之前的弹性变形，而不考虑硬化的材料，也即材料进入塑性状态后，应力不再增加可连续产生塑性变形。

弹塑性硬化材料在塑性变形时，既要考虑塑性变形之前的弹性变形，又要考虑加工硬化的材料，这种材料在进入塑性状态后，如应力保持不变，则不能进一步变形。只有在应力不断增加，也即在加载条件下才能连续产生塑性变形。

刚塑性材料在研究塑性变形时不考虑塑性变形之前的弹性变形。

理想刚塑性材料在研究塑性变形时，既不考虑弹性变形，又不考虑变形过程中的加工硬化的材料。

刚塑性硬化材料在研究塑性变形时，不考虑塑性变形之前的弹性变形，但需要考虑变形过程中的加工硬化材料。

（2）屈服准则

受力物体内质点处于单向应力状态时，只要单向应力大到材料的屈服点时，则该质点开始由弹性状态进入塑性状态，即处于屈服。

受力物体内质点处于多向应力状态时，必须同时考虑所有的应力分量。在一定的变形条件（变形温度、变形速度等）下，只有当各应力分量之间符合一定关系时，质点才开始进入塑性状态，这种关系称为屈服准则，也称塑性条件。它是描述受力物体中不同应力状态下的质点进入塑性状态并使塑性变形继续进行所必须遵守的力学条件，这种力学条件一般可表示为 $f(\sigma_{ij})=C$，又称为屈服函数，式中 C 是与材料性质有关而与应力状态无关的常数，可通过试验求得。屈服准则是求解塑性成形问题必要的补充方程。

10.1.2 非线性问题的分类

引起结构非线性的原因可以分为 3 种主要类型：几何非线性、材料非线性和状态变化。

（1）几何非线性

如果结构经受大变形，几何形状的变化可能会引起结构的非线性响应。如图 10-2 所示的钓杆。随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲以至于力臂明显地减少，导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。几何非线性的特点是大位移、大转动。

（2）材料非线性

非线性的应力应变关系是结构非线性行为的常见原因。许多因素可以影响材料的应力应变性质，包括加载历史（如在弹-塑性响应情况下）、环境状况（如温度）、加载的时间总量（如在蠕变响应情况下）。

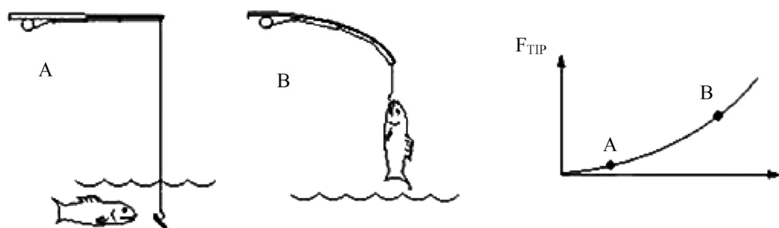


图 10-2 大变形导致结构非线性

（3）状态变化

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如，一根只能拉伸的电缆可能是松的，也可能是绷紧的。轴承套可能是接触的，也可能是不接触的。冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变而变化。状态改变也许和载荷直接有关（如在电缆情况中），也可能由某种外部原因引起（如在冻土中的紊乱热力学条件）。接触是一种很普遍的非线性行为。接触是状态变化非线性中一个特殊而重要的子集。

10.1.3 非线性分析的收敛问题

如果用户在以前未应用过某一种非线性特性，则应当在分析大型、复杂的模型之前，首先建立一个简单的模型（即只包含几个单元的模型），并确保对其特性了解。

保持最终模型尽可能简单。如果可用二维平面应力、平面应变或轴对称模型来代表三维结构，就应该这么做。如果可通过对称或反对称面来使模型规模减小，也应该这么做。然而，如果荷载是反对称的，则通常不采用反对称的特点。反对称也可能在大变形分析时不适于运用。如果忽略某一非线性细节而不会影响模型关键区域的结果，那么就应这么做。在可能时，用静力等效荷载来模拟瞬态动力荷载。

应当认识到，在经受塑性变形的区域，要求相当的积分点密度。低阶单元提供了与高阶单元相同的积分点数目，因此在塑性分析中应用低阶单元较合算。在塑性较区域，网格密度尤其重要。在接触表面要有足够的网格密度，以使接触应力分布较光滑。

为了求解应力，也要有足够的网格密度。需要计算应力或应变的区域要比位移或非线性解析区域网格要密一些。对于需要高阶模态时，网格密度要足够。需要的单元数目，取决于单元假定的位移形状函数，以及模态形状本身。对于瞬态动力波传播，要采用足够密的网格。如果波传播很重要，则一个波长最小要 20 单元。

对于非保守、路径相关系统，施加荷载时要用足够小的荷载增量，以保证分析接近荷载—响应曲线。有时，可以采用逐渐地加载，而使保守系统的收敛行为有所改进，这样可使 Newton－Raphson 平衡迭代数最小。

收敛失败可能表示结构产生物理上的不稳定性，也可能仅仅是在有限元模型中的某些数值问题引起的。在执行非线性分析过程中，ANSYS 在每个迭代期间根据收敛准则计算收敛模。在计算过程中将显示计算的收敛模以及准则。典型的收敛范数曲线如图 10-3 所示。

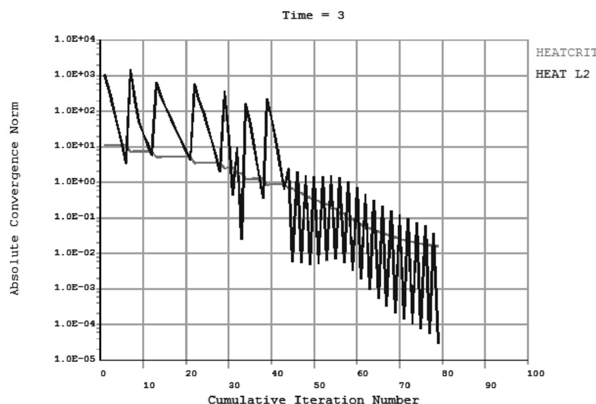


图 10-3　绝对收敛范数-累积迭代次数

10.2　螺栓联接件的接触分析

螺栓是由头部和螺杆（带有外螺纹的圆柱体）两部分组成的一类紧固件，需与螺母配合，用于紧固联接两个带有通孔的零件。这种联接形式称螺栓联接。

10.2.1　实例背景

普通螺栓拧紧螺母时产生的预拉力很小，由板面挤压产生的摩擦力可以忽略不计。普通螺栓抗剪连接是依靠孔壁承压和螺栓杆抗剪来传力的。

高强度螺栓除了其材料强度高之外，施工时还给螺栓杆施加很大的预拉力，使板面间产生挤压力，因此垂直于螺栓杆方向受剪时有很大的摩擦力。依靠摩擦力阻止板面间相对滑移，达到传力的目的，因此变形较小。

普通螺栓优点是施工简单，拆卸方便；缺点是用钢量多；适用于安装联接和需要经常拆卸的结构。

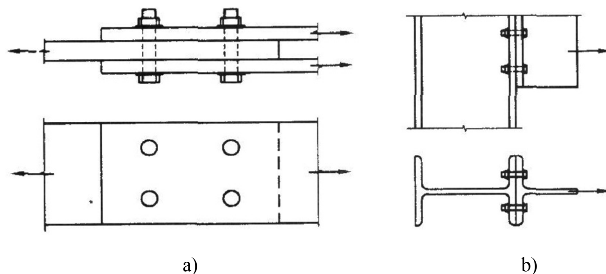
普通螺栓联接按照螺栓传力方式分为 3 种形式：

1）抗剪螺栓联接——受力垂直螺栓杆，靠孔壁承压和螺栓杆抗剪传力。

2）抗拉螺栓联接——受力平行螺栓杆，靠螺栓杆承载拉力。

3）既受剪又受拉，称为拉剪共同作用——两者兼有。

如图 10-4a 所示为抗剪螺栓联接，图 10-4b 所示为抗拉螺栓联接。



a)　　　　b)

图 10-4　螺栓联接

a) 抗剪螺栓联接　b) 抗拉螺栓联接

剪力螺栓可能发生的破坏形式有如下几种。

- 螺栓剪断。
- 钢板孔壁挤压破坏。
- 钢板由于螺孔削弱而净截面拉断。
- 钢板因螺栓孔端距过小而剪坏。
- 螺杆因太长或螺孔大于螺杆直径而产生受弯破坏。

如图 10-5 所示，板较厚而螺栓较细时，可能发生螺栓被剪断，而如图 10-6 所示，板较薄但螺栓较粗时，螺栓孔壁可能被挤坏。

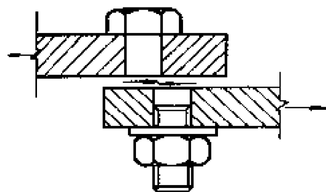


图 10-5 螺栓剪断

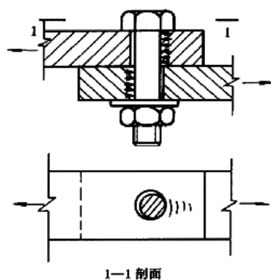


图 10-6 孔壁挤压破坏

若在板上开孔，板的截面被削弱时，也可能出现被拉断的情况，如图 10-7 所示。螺栓端距过小时，钢板可能被剪坏，如图 10-8 所示。

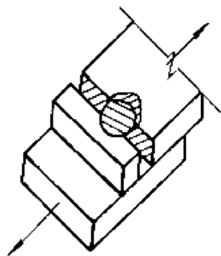


图 10-7 钢板拉断

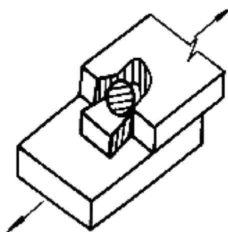


图 10-8 钢板剪坏

若钢板过厚而螺栓过于细长时，螺栓可能出现弯曲破坏，如图 10-9 所示。

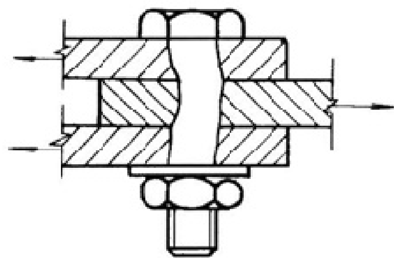


图 10-9 螺栓弯曲破坏

本例将介绍一个螺栓联接的钢梁的分析，探讨有限元方法在螺栓联接件分析中的应用。钢梁的几何模型如图 10-10 所示。

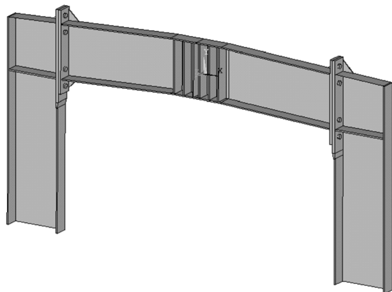


图 10-10　钢梁模型

10.2.2 分析过程

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。设置参数、工作目录、工作名称，单击 Run 按钮进入 ANSYS 15.0 GUI 界面。

2）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Parameters> Scalar Parameters 命令，定义如下参数。

```
hc=400          !柱截面高度
bc=200          !柱截面宽度
tcf=10          !柱翼缘厚度
tcw=8           !柱腹板厚度
lc=1100         !柱构件伸出长度
tep=20          !端板厚度
bep=bc+20       !端板宽度
HEP1=hc+200     !端板高度
tst=10          !端板外伸部分加劲肋厚度
hst=80          !端板外伸部分加劲肋高度
bst=bc/2-5      !端板外伸部分加劲肋高度
lbt=2*tep       !螺栓杆长度
dbt=20          !螺栓杆直径或有效直径
dbth=31.4       !螺栓头和螺母直径
lbth=12.5       !螺栓头厚度
preten=155000   !螺栓施工预拉力
miu=.4          !端板间抗滑移系数
hb=400          !梁截面高度
bb=200          !梁截面宽度
tbf=8           !梁翼缘厚度
tbw=6           !梁腹板厚度
lb1=870         !梁构件伸出长度
lb2=200         !梁构件伸出的水平加载段长度
hb1=362         !梁最左端高度
dh0=dbt+2       !螺栓孔直径
```

```
randa=0.05          !梁的坡度
aa=50               !螺栓中心到梁翼缘边缘（非受力方向）的距离
aa1=50              !螺栓中心到梁翼缘边缘（受力方向）的距离
ab=120              !一二排螺栓间距
displa=-50          !施加的位移荷载大小
```

3）完成参数定义后，开始建立几何模型。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions 命令，输入第一个块的参数：X1=0、X2=tep、Y1= -hep1/2、Y2=hep1/2、Z1=0、Z2=bep/2，单击 Apply 按钮。

输入第二个块体的参数：X1=-tep、X2=0、Y1=-hep1/2-100+4*tcf、Y2=hep1/2、Z1=0、Z2=bep/2，生成两个块体如图 10-11 所示。

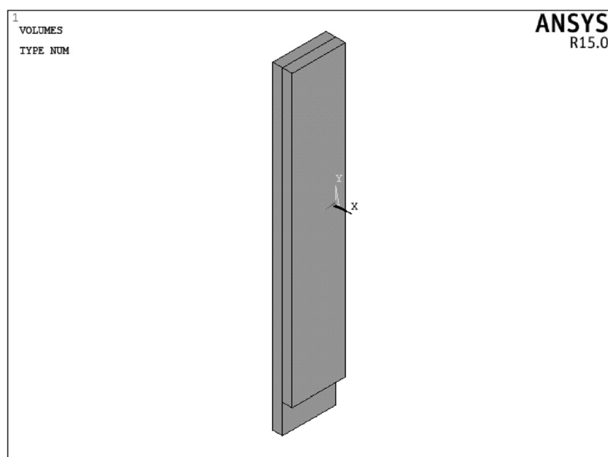


图 10-11　生成两个块体

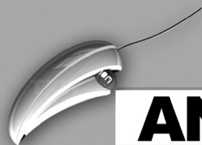
4）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，输关键点的坐标，完成表 10-1 中所列的关键点的定义。

表 10-1　20～27 号关键点

关键点编号	X	Y	Z
20	tep	hb/2	
21	tep	hb/2-tbf	
22	tep+lb1	hb/2-tbf+lb1*randa	
23	tep+lb1	hb/2+lb1*randa	
24	tep	hb/2	bb/2
25	tep	hb/2-tbf	bb/2
26	tep+lb1	hb/2-tbf+lb1*randa	bb/2
27	tep+lb1	hb/2+lb1*randa	bb/2

完成定义的关键点如图 10-12 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Arbitrary> Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 20,21,22,23,24,25,26,27，用英文逗号隔开，或



者直接在工作区中拾取 20～27 号关键点。生成的梁板如图 10-13 所示。

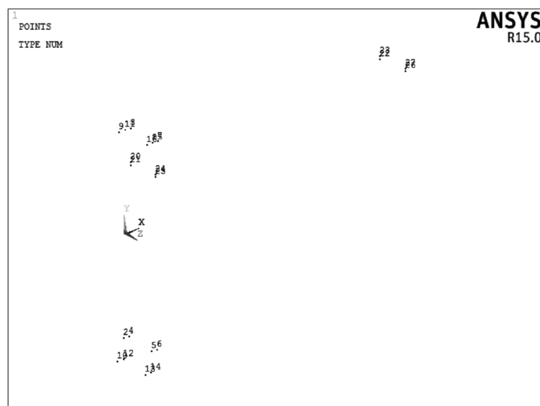


图 10-12　生成 20～27 号关键点

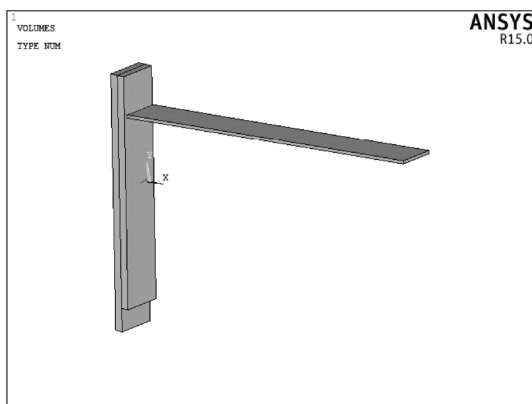


图 10-13　生成梁板（一）

5）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，输入关键点的坐标，完成表 10-2 中所列的关键点的定义。

表 10-2　28～35 号关键点

关键点编号	X	Y	Z
28	tep	hb/2-tbf	
29	tep	-hb/2+tbf	
30	tep+lb1	-hb/2+tbf+LB1*randa	
31	tep+lb1	hb/2-tbf+lb1*randa	
32	tep	hb/2-tbf	tbw/2
33	tep	-hb/2+tbf	tbw/2
34	tep+lb1	-hb/2+tbf+lb1*randa	tbw/2
35	tep+lb1	hb/2-tbf+lb1*randa	tbw/2

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Arbitrary> Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 28,29,30,31,32,33,34,35，用英文逗号隔开，或者直接在工作区中拾取 28～35 号关键点。生成的梁板如图 10-14 所示。

6）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Block> By Dimensions 命令，输入第一个块的参数：X1=tep+lb1、X2=tep+lb1+lb2、Y1=hb/2-tbf+lb1*randa、Y2=hb/2+lb1*randa、Z1=0、Z2=bb/2，单击 Apply 按钮。

输入第二个块的参数：X1 = tep+lb1、X2 = tep+lb1+lb2、Y1 = -hb/2+tbf+lb1*randa、Y2 = hb/2-tbf+lb1*randa、Z1 = 0、Z2 = tbw/2，单击 OK 按钮完成，生成两个块如图 10-15 所示。

7）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls> Numbering 命令，弹出图 10-16 所示的 Plot Numbering Controls 对话框。勾选 Volume numbers 选项，单击 OK 按钮，在工作区中显示体编号如图 10-17 所示。注意 3 号体与 5 号体的位置。

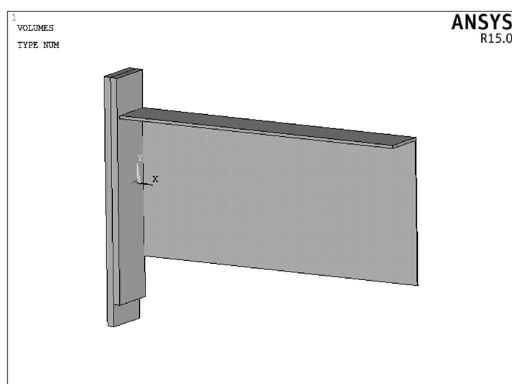


图 10-14　生成梁板（二）

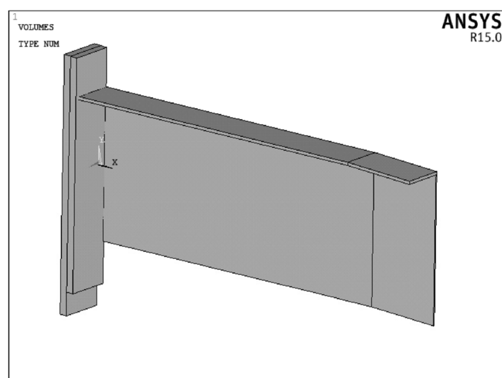


图 10-15　生成两个块

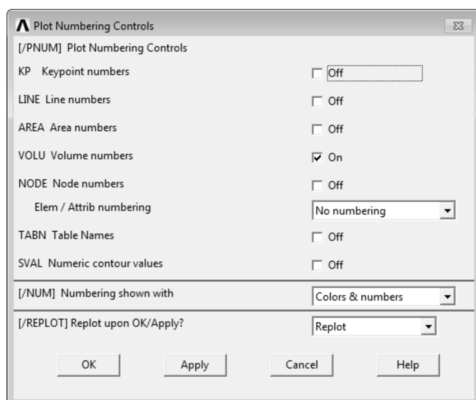


图 10-16　Plot Numbering Controls 对话框

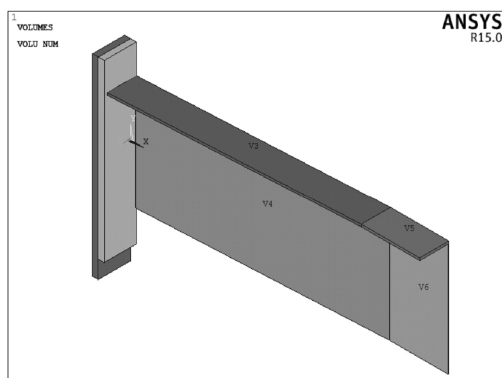


图 10-17　显示体编号

8）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Copy> Volumes 命令，拾取 3 号体与 5 号体，单击 OK 按钮，弹出图 10-18 所示的 Copy Volumes 对话框。

输入复制的份数 2，DY= −hb+tbf，单击 OK 按钮。复制梁板如图 10-19 所示。

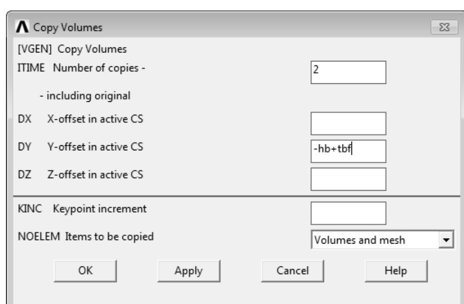


图 10-18　Copy Volumes 对话框

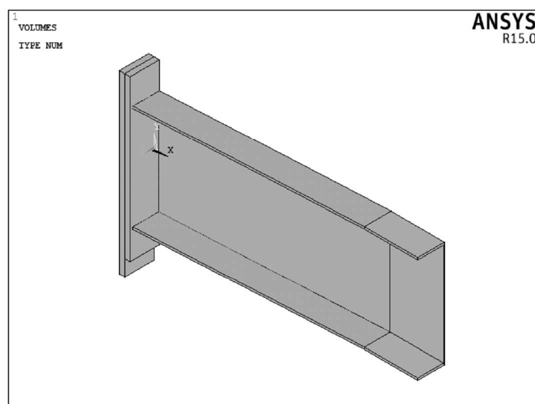


图 10-19　复制梁板

9）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，输入关键点的坐标，完成表 10-3 所列的 80～87 号关键点的定义。

表 10-3　80～97 号关键点

关键点号	X	Y	Z
80	−tep	−hep1/2−100+4*tcf	
81	−tep	−hep1/2−100	
82	−tep+tcf	−hep1/2−100	
83	0	−hep1/2−100+4*tcf	
84	−tep	−hep1/2−100+4*tcf	bep/2
85	−tep	−hep1/2−100	bep/2
86	−tep+tcf	−hep1/2−100	bep/2
87	0	−hep1/2−100+4*tcf	bep/2

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary> Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 80,81,82,83,84,85,86,87，用英文逗号隔开，或者直接在工作区中拾取 80～87 号关键点。生成的体如图 10-20 所示。

10）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Block> By Dimensions 命令，输入第一个块的参数：X1=−tep、X2=−tep+tcf、Y1=−hep1/2−100、Y2=−hb/2−lc、Z1=0、Z2=bc/2，单击 Apply 按钮；输入第二个块的参数：X1=−tep−hc+tcf、X2=−tep−hc+2*tcf、Y1=−hb/2−lc、Y2=hb/2−(hc−2*tcf)*randa、Z1=0、Z2=bc/2，单击 OK 按钮完成，生成柱翼缘如图 10-21 所示。

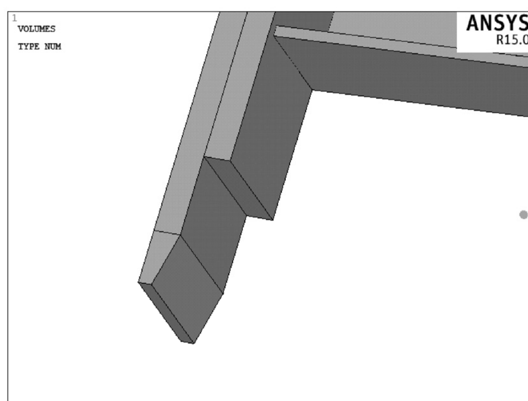


图 10-20　生成端板对接斜坡

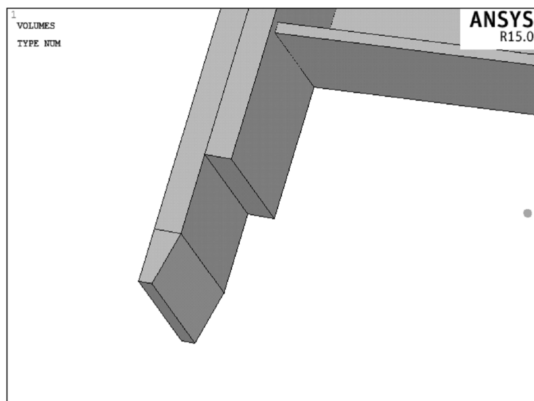


图 10-21　生成柱翼缘

11）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，输入关键点的坐标，完成表 10-4 中所列关键点的定义。

表 10-4 89～96 号关键点

关键点号	X	Y	Z
89	−tep−hc+2*tcf	−hb/2−lc	0
90	−tep	−hb/2−lc	0
91	−tep	hb/2−tbf	0
92	−tep−hc+2*tcf	hb/2− (hc−2*tcf)*randa−tbf	0
93	−tep−hc+2*tcf	−hb/2−lc	0
94	−tep	−hb/2−lc	0
95	−tep	hb/2−tbf	0
96	−tep−hc+2*tcf	hb/2− (hc−2*tcf)*randa−tbf	0

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 89,90,91,92,93,94,95,96，用英文逗号隔开，或者直接在工作区中拾取 89～96 号关键点。生成柱腹板如图 10-22 所示。

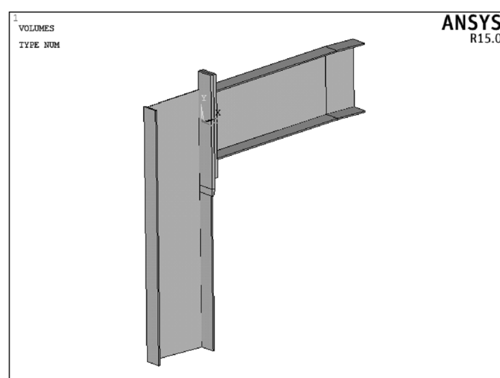


图 10-22 生成柱腹板（一）

12）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 命令，输入关键点的坐标，完成表 10-5 中所列关键点的定义。

表 10-5 97～100 号关键点

关键点号	X	Y	Z
97	−tep−hc+2*tcf	hb/2− (hc−2*tcf)*randa	
98	−tep	hb/2	
99	−tep−hc+2*tcf	hb/2− (hc−2*tcf)*randa	bb/2
100	−tep	hb/2	bb/2

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 91,92,97,98,95,96,99,100，用英文逗号隔开，或者直接在工作区中依次拾取 91、92、97、98、95、96、99、100 号关键点。生成的体如图 10-23 所示。

13）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Volumes> Block> By

Dimensions 命令，输入块的参数：X1=-tep-hc+2*tcf、X2=-tep、Y1=-hb/2、Y2=-hb/2+tst、Z1=tcw/2、Z2=tcw/2+bst，单击 OK 按钮完成。生成块体如图 10-24 所示。

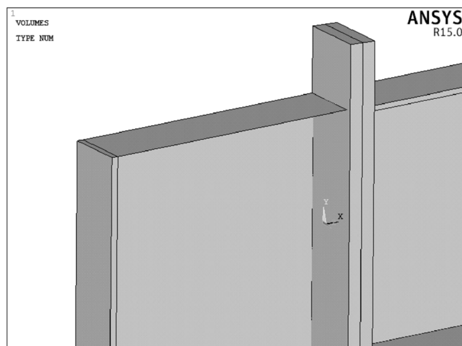


图 10-23　生成柱腹板（二）

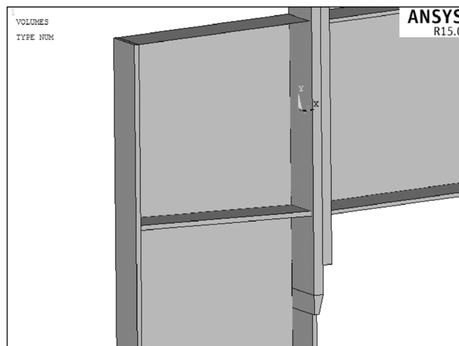


图 10-24　生成柱腹板（三）

14）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，输入关键点的坐标，完成表 10-6 中所列关键点的定义。

表 10-6　109～114 号关键点

关键点号	X	Y	Z
109	tep	hb/2	
110	tep+hst	hb/2+hst*randa	
111	tep	hb/2+hst	
112	tep	hb/2	tst/2
113	tep+hst	hb/2+hst*randa	tst/2
114	tep	hb/2+hst	tst/2

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary> Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 109,110,111,112,113,114，用英文逗号隔开，或者直接在工作区中拾取 109～114 号关键点。生成的体如图 10-25 所示。

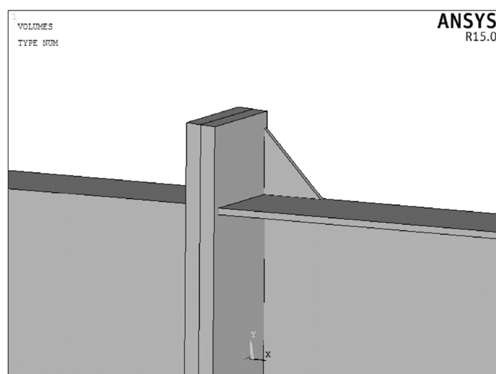


图 10-25　端板外伸肋板（一）

15）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，输入关键点的坐标，完成表 10-7 中所列关键点的定义。

表 10-7　115～120 号关键点

关键点号	X	Y	Z
115	tep	−hb/2	
116	tep+hst	−hb/2+hst*randa	
117	tep	−hb/2−hst	
118	tep	−hb/2	tst/2
119	tep+hst	−hb/2+hst*randa	tst/2
120	tep	−hb/2−hst	tst/2

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Arbitrary> Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 115,116,117,118,119,120，用英文逗号隔开，或者直接在工作区中拾取 115～120 号关键点。生成的体如图 10-26 所示。

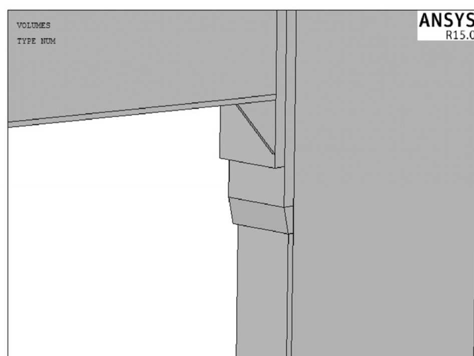


图 10-26　端板外伸肋板（二）

16）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，输入关键点的坐标，完成表 10-8 中所列关键点的定义。

表 10-8　121～126 号关键点

关键点号	X	Y	Z
121	−tep	hb/2	
122	−tep−hst	hb/2−hst*randa	
123	−tep	hb/2+hst	
124	−tep	hb/2	tst/2
125	−tep−hst	hb/2−hst*randa	tst/2
126	−tep	hb/2+hst	tst/2

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Arbitrary> Through KPs 命令，在拾取框中输入关键点号 121,122,123,124,125,126，用英文逗号隔开，或者直接在工作区中拾取 121～126 号关键点。生成的体如图 10-27 所示。

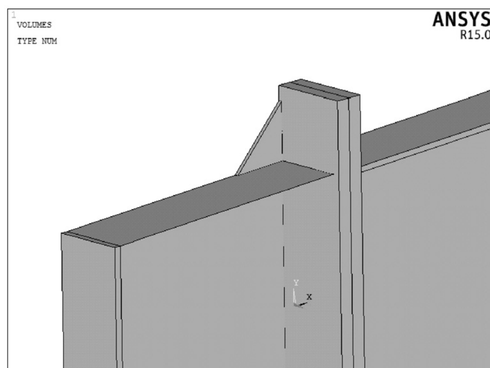


图 10-27　端板外伸肋板（三）

17）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>WorkPlane> Offset WP by Increments 命令，设置工作平面的移动距离为 X=tep+lb1+lb2/2、Y=-hb/2+tbf+lb1*randa。

18）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Volumes> Block> By Dimensions 命令，输入块的参数：X1=-tst/2、X2=tst/2、Y1=0、Y2=hb-2*tbf、Z1=tbw/2、Z2=tbw/2+bst，单击 Apply 按钮。

输入第二个块的参数：X1=75-tst/2、X2=tst/2+75、Y1=0、Y2=hb-2*tbf、Z1=tbw/2、Z2=tbw/2+bst，单击 Apply 按钮。

输入第三个块的参数：X1=-75-tst/2、X2=-75+tst/2、Y1=0、Y2=hb-2*tbf、Z1=tbw/2、Z2=tbw/2+bst，单击 OK 按钮，生成的 3 个块体如图 10-28 所示。

19）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>WorkPlane> Align WP with> XYZ Locations 命令，输入工作平面的坐标参数 X=0、Y=hb/2+100-aa、Z=bep/2-aa1、XXAX=0、YXAX=hb/2+aa+10、ZXAX=bep/2-aa1、XPLAN=0、YPLAN=hb/2-aa+100+10、ZPLAN=bep/2-aa1+10，单击 OK 按钮完成。

20）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cylinder> By Dimensions 命令，输入圆柱的参数：RAD1=dh0/2、RAD2=0、Z1=-tep-10、Z2=tep+10、THETA1=0、THETA2=360，生成螺栓如图 10-29 所示。

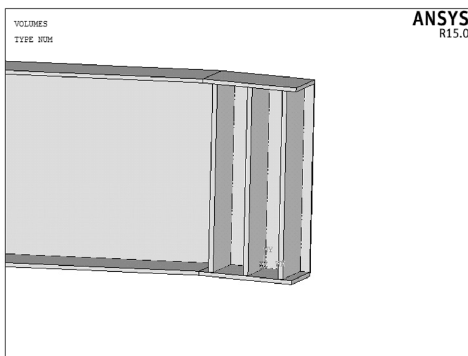


图 10-28　生成梁肋板

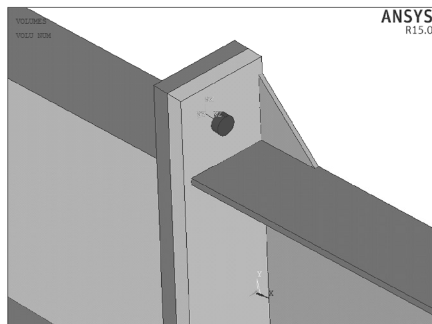


图 10-29　生成第一个螺栓

21）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，在 Select Entities 对话框中使用按坐标位置选择体的功能选择出位于 Y=hb/2+100−aa 的体，也即上一步生成的圆柱。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Copy> Volumes 命令，设置复制的份数为 2，沿 Y 方向偏移为−ab，单击 OK 按钮。生成圆柱阵列如图 10−30 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Copy> Volumes 命令，拾取上一步生成的两个圆柱，设置复制的份数为 2，沿 Y 方向偏移为− (hep1−2*aa−ab)，单击 OK 按钮。生成圆柱阵列如图 10−31 所示。

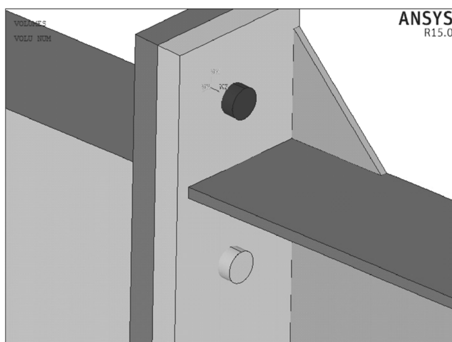


图 10−30　阵列（一）

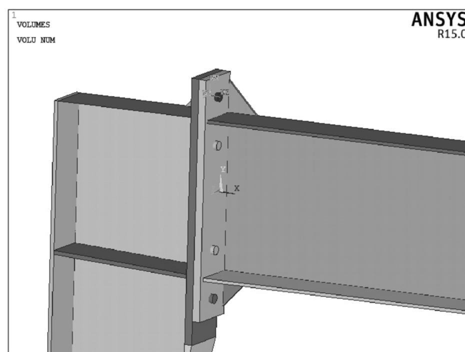


图 10−31　阵列（二）

22）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate>Booleans> Subtract> Volumes 命令，弹出拾取框后，先拾取与圆柱相交的两个板，单击 OK 按钮，再拾取 4 个圆柱，单击 OK 按钮。将梁与柱连接处打出孔，如图 10−32 所示。

23）接下来开始建立螺栓。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cylinder> By Dimensions 命令，输入第一个圆柱的参数：RAD1=dbt/2、RAD2=0、Z1=−tep、Z2=tep、THETA1=0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第二个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=−tep−lbth、Z2=−tep、THETA1=0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第三个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=tep、Z2=tep+lbth、THETA1=0、THETA2=360，单击 OK 按钮，生成螺栓如图 10−33 所示。

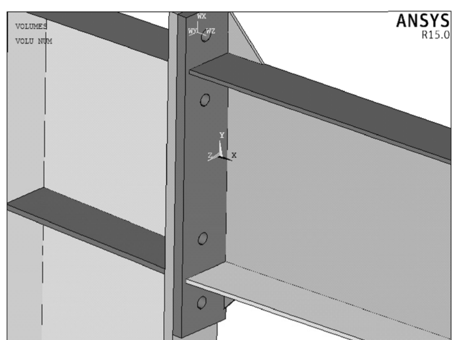


图 10−32　螺栓孔

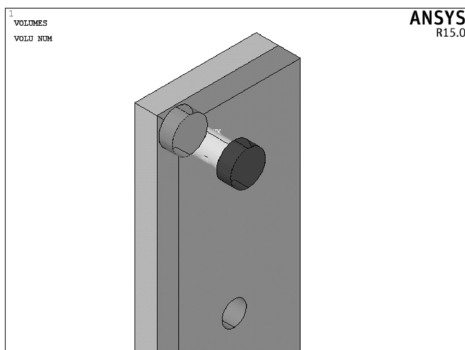


图 10−33　生成第一组螺栓模型

24）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>WorkPlane> Offset WP by Increments 命令，将工作平面沿 X 方向移动−ab。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cylinder> By Dimensions 命令，输入第一个圆柱的参数：RAD1=dbt/2、RAD2=0、Z1=−tep、Z2=tep、THETA1=0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第二个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=−tep−lbth、Z2=−tep、THETA1= 0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第三个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=tep、Z2=tep+lbth、THETA1=0、THETA2=360，单击 OK 按钮，生成螺栓如图 10−34 所示。

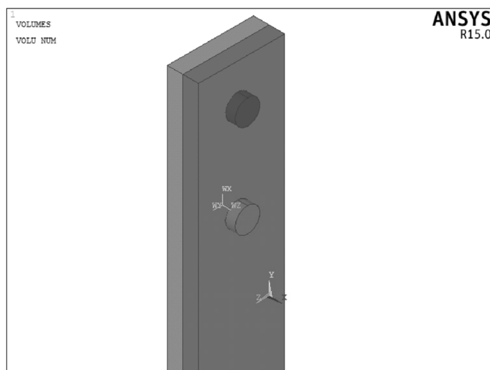


图 10−34　生成第二组螺栓模型

25）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>WorkPlane> Offset WP by Increments 命令，将工作平面沿 X 方向移动− (hep1−2*aa−ab)。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cylinder> By Dimensions 命令，输入第一个圆柱的参数：RAD1=dbt/2、RAD2=0、Z1=−tep、Z2=tep、THETA1=0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第二个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=−tep−lbth、Z2=−tep、THETA1=0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第三个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=tep、Z2=tep+lbth、THETA1=0、THETA2=360，单击 OK 按钮，生成螺栓如图 10−35 所示。

26）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>WorkPlane> Offset WP by Increments 命令，将工作平面沿 X 方向移动 ab。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Volumes> Cylinder> By Dimensions 命令，输入第一个圆柱的参数：RAD1=dbt/2、RAD2=0、Z1=−tep、Z2=tep、THETA1=0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第二个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=−tep−lbth、Z2=−tep、THETA1=0、THETA2=360，单击 Apply 按钮。

输入第三个圆柱的参数：RAD1=dbth/2、RAD2=0、Z1=tep、Z2=tep+lbth、THETA1=0、THETA2=360，单击 OK 按钮，生成圆柱如图 10−36 所示。

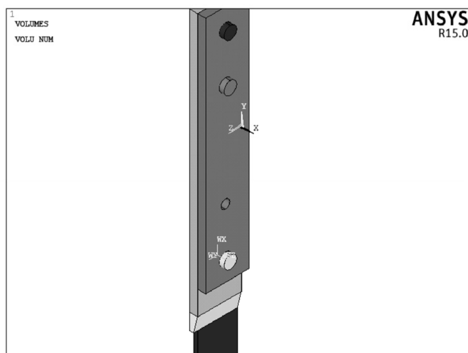


图 10-35　生成第三组螺栓模型

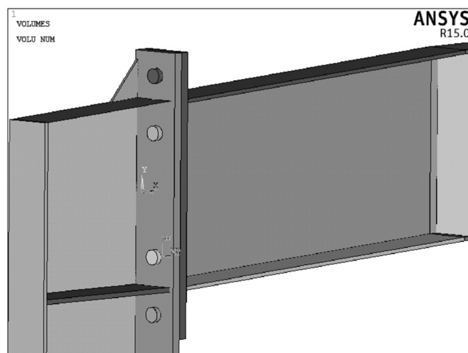


图 10-36　生成第四组螺栓模型

27）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Numbering Ctrls> Merge Items 命令，弹出图 10-37 所示的 Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框。

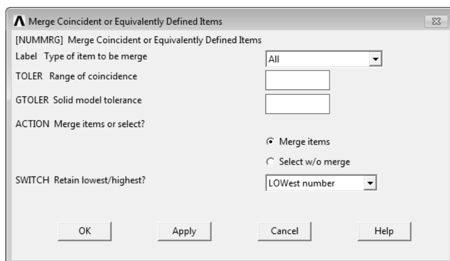


图 10-37　Merge Coincident or Equivalently Defined Items 对话框

设置压缩项目为 All，单击 OK 按钮。

28）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，选择立柱与属于立柱的肋板，如图 10-38 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate>Booleans> Glue> Volumes 命令，单击 Pick All 按钮，将肋板与柱体粘接到一起。

29）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，选择横梁与属于梁的肋板，如图 10-39 所示。

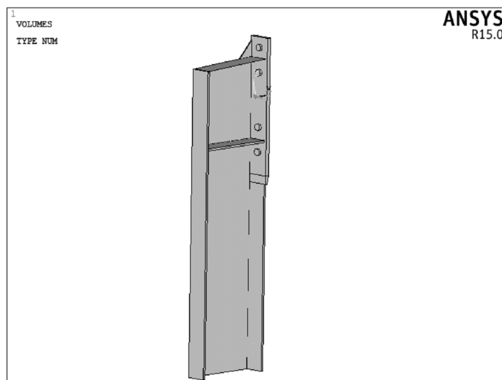


图 10-38　选出立柱

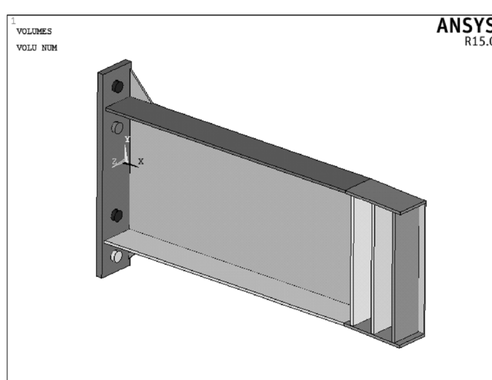


图 10-39　选出横梁

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate>Booleans> Glue> Volumes 命令，单击 Pick All 按钮，将肋板与梁粘接到一起。

30）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，根据坐标选择体，选出 Z=bep/2-aa1 的体，即在工作区同选择出 4 组螺栓，如图 10-40 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Operate>Booleans> Glue> Volumes 命令，单击 Pick All 按钮，将 4 组螺栓粘接。

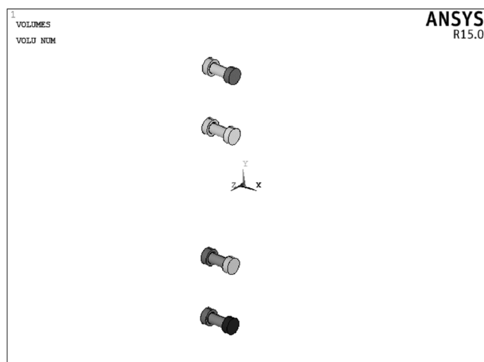


图 10-40　螺栓组

31）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 命令，单击 Add 按钮，弹出图 10-41 所示的 Library of Element Types 对话框，选择 SOLID187 号单元。

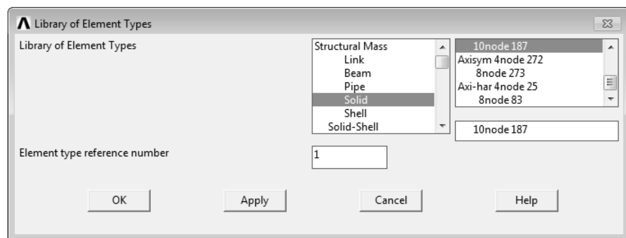


图 10-41　Library of Element Types 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，弹出图 10-42 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，定义材料模型 1 为线弹性各向同性，EX=206E3，PRXY=0.3，定义屈服强度为 345，用于模拟梁与柱的 Q345 钢材料。

屈服强度的双线性模型在 Define Material Model Behavior 对话框中的位置如图 10-42 所示。

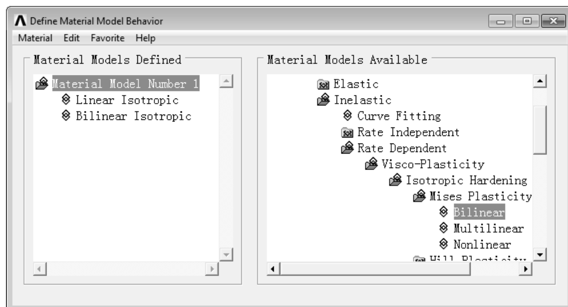


图 10-42　Define Material Model Behavior 对话框

在 Define Material Model Behavior 对话框中的 Material>New Model 中新建一个材料模型 2，用作模拟高强度螺栓。材料 2 的线性参数同材料 1，屈服强度为 940。

32）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Volumes 命令，拾取模型中的 4 组螺栓，单击 OK 按钮，弹出图 10-43 所示的 Volume Attributes 对话框。

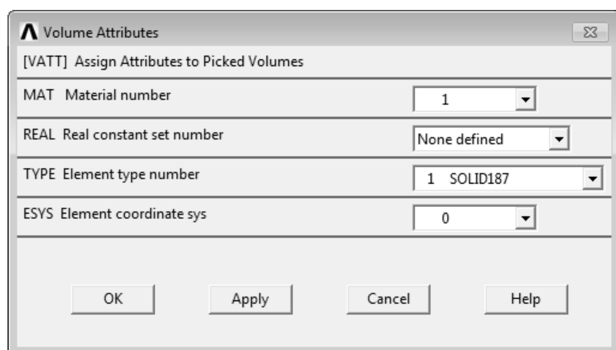


图 10-43 Volume Attributes 对话框

设置材料编号为 2，单击类型号为 1，单击 OK 按钮完成。

在 GUI 界面中选择选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 SelectEntities 对话框中选出 4 组螺栓组，然后单击 Invert 按钮，选出梁与柱。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>All Volumes 命令，在 Volume Attributes 对话框中定义材料编号为 1，单元号为 1。

33）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 SelectEntities 对话框中选出螺栓组的 4 个螺杆圆柱，如图 10-44 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 命令，单击 Pick All 按钮，完成网格的划分如图 10-45 所示。

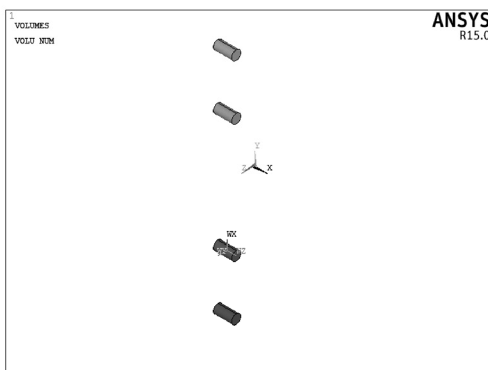


图 10-44 选出 4 个螺杆圆柱

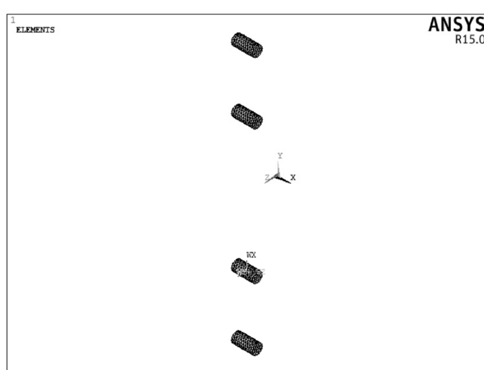


图 10-45 划分螺杆

34）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中选出螺栓组的螺栓头与螺母，如图 10-46 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 命令，单击 Pick All 按钮，如图 10-47 所示为一个简化螺栓模型的网格。

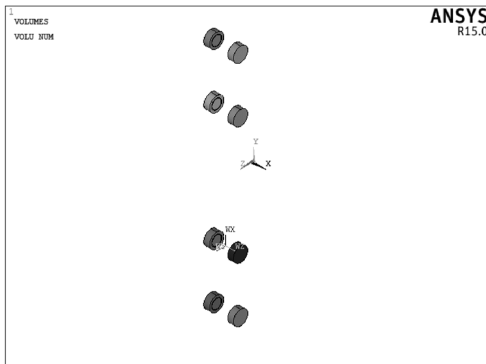


图 10-46　选出螺栓头与螺母

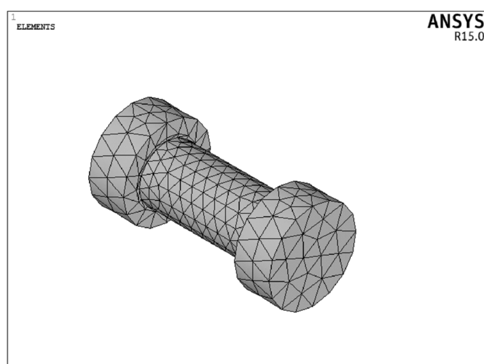


图 10-47　螺栓网格

35）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框选择出如图 10-48 所示的体，这些体是梁与体的连接端板。

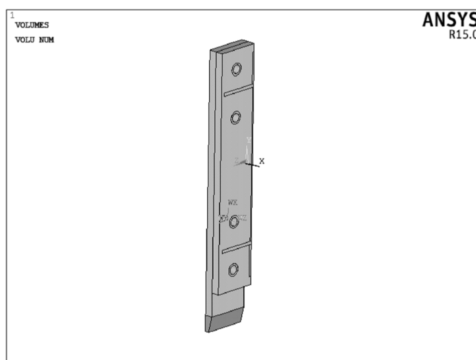


图 10-48　选出端板

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component 命令，弹出图 10-49 所示的 Create Component 对话框，输入组件名称为 endplate，单击 OK 按钮。

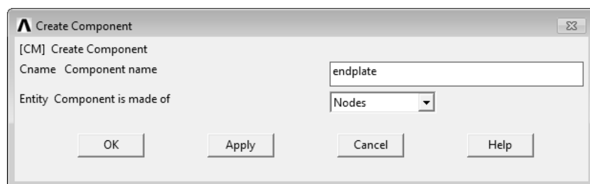


图 10-49　Create Component 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size 命令，弹出图 10-50 所示的 Global Element Sizes 对话框，设置单元尺寸为 bep/10。

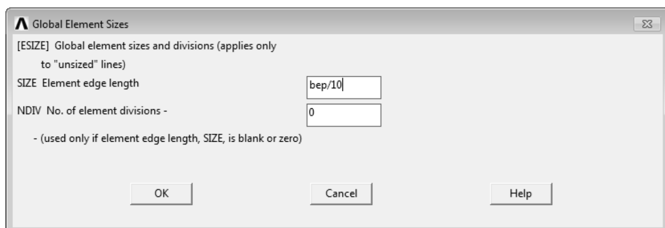


图 10-50 Global Element Sizes 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 命令，单击 Pick All 按钮，完成划分如图 10-51 所示，图 10-52 所示为接触位置的网格细节。

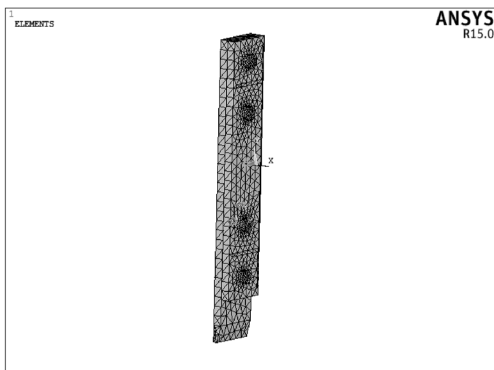


图 10-51 划分端板

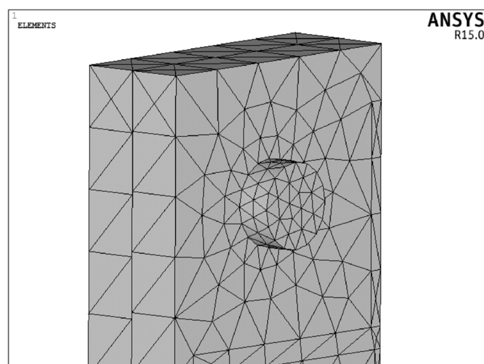


图 10-52 网格细节

36）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中选出立柱腹板，如图 10-53 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size 命令，定义这些体为组件 col_web。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 命令，单击 Pick All 按钮，完成划分如图 10-54 所示。

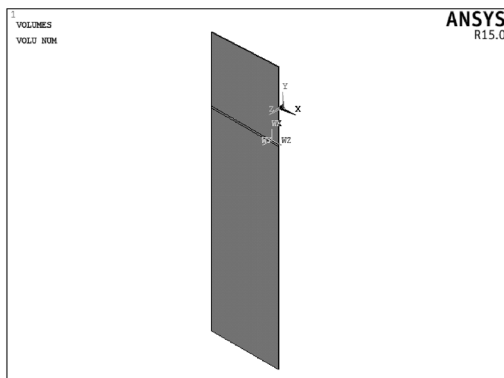


图 10-53 选出立柱腹板



图 10-54 划分立柱腹板

37）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中选择出立柱还未划分的部分，如图 10-55 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size 命令，定义单元尺寸为 bc/6。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 命令，单击 Pick All 按钮，完成划分如图 10-56 所示。

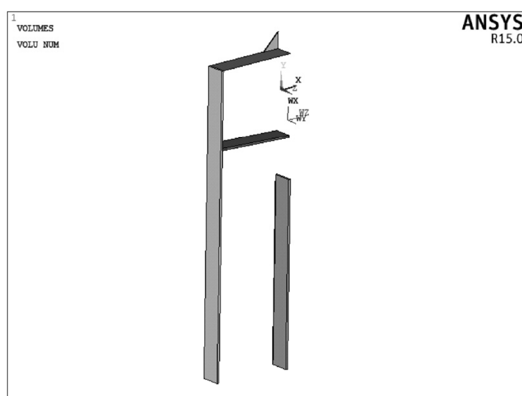


图 10-55　立柱剩余部分

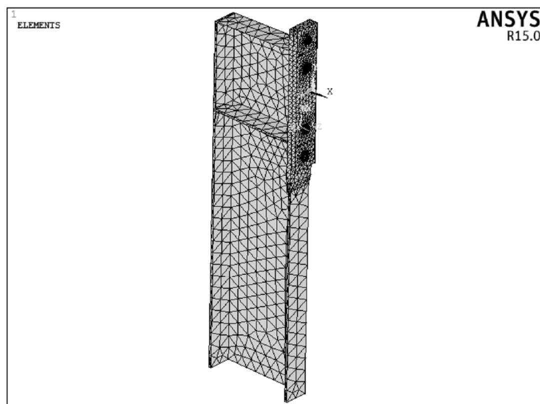


图 10-56　划分立柱

38）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中选出梁与属于梁的肋板，如图 10-57 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 命令，单击 Pick All 按钮，完成划分如图 10-58 所示。

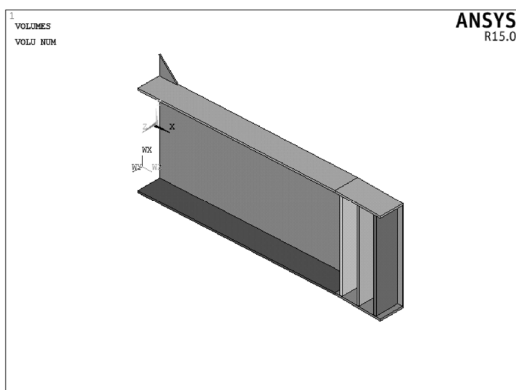


图 10-57　选出梁

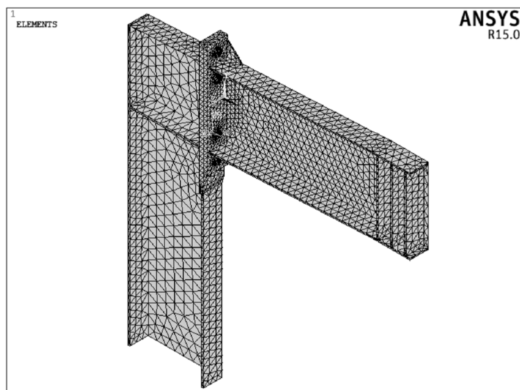


图 10-58　划分横梁

39）完成网格的划分后，开始定义接触。在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Select Comp/Assembly 命令，在弹出的对话框中选择 By Component Name，单击 OK 按钮，弹出图 10-59 所示的 Select Component or Assembly 对话框。

在 Select Component or Assembly 对话框中选择组件 ENDPLATE，选择方式为 From full

set，单击 OK 按钮，选出的端板如图 10-60 所示。

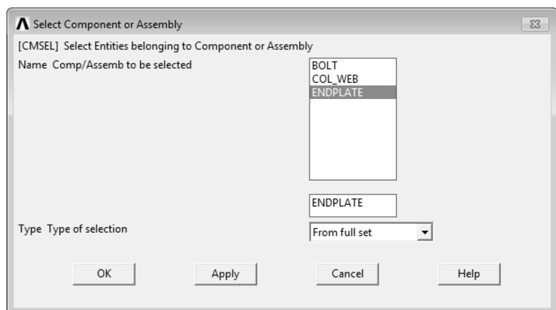


图 10-59 Select Component or Assembly 对话框

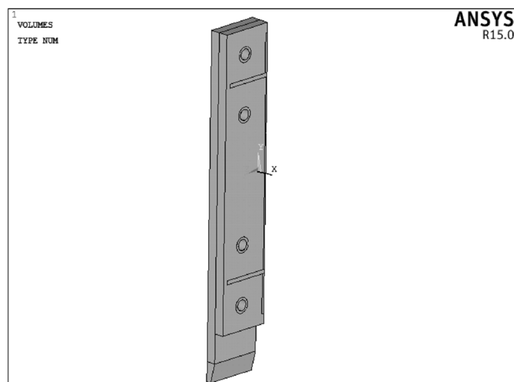


图 10-60 选出端板

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中选出属于柱的与梁端板接触的面，如图 10-61 所示。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component 命令，将上一步选出的面定义为组件 TARGET1。

重复上述操作，选择梁的接触端面如图 10-62 所示，定义为 CONTACT1 组件。

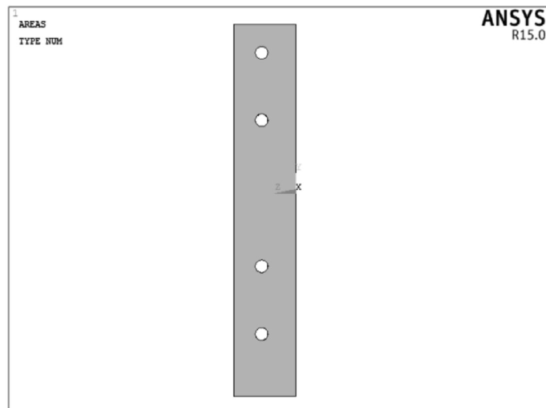


图 10-61 柱的接触端面

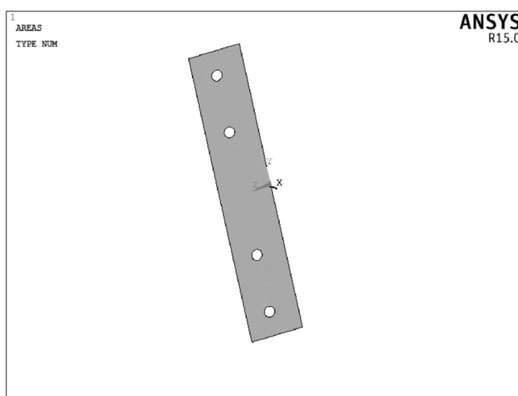
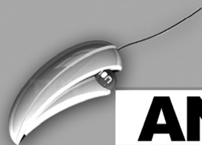


图 10-62 梁的接触端面

40）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 命令，定义 3 号单元为 TARGE170，4 号单元为 CONTA174。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，在图 10-63 所示的 Define Material Model Behavior 对话框中为材料 1 添加摩擦系数为 0.4。

Friction Coefficient 模型在 Define Material Model Behavior 对话框中的位置如图 10-63 所示，在图 10-64 所示的 Friction Coefficient for Material Number 1 对话框中输入 MU=0.4，单击 OK 按钮完成摩擦系数的定义。



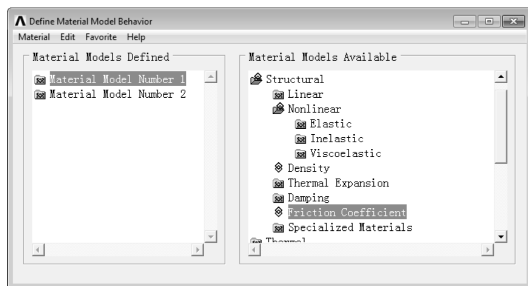


图 10-63　Define Material Model Behavior 对话框

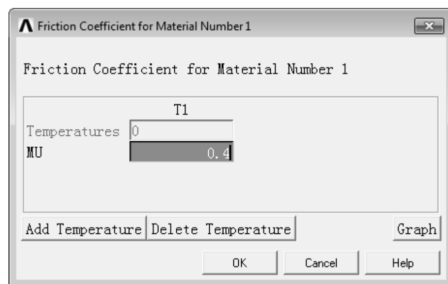


图 10-64　材料 1 摩擦系数

41）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，在 Select Entities 对话框中选择组件 TARGET1，然后使用 Attached to 选出属于这个面的节点，如图 10-65 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Surf / Contact>Inf Acoustic 命令，在选出的节点生成接触目标单元如图 10-66 所示。重复上述操作，选出 CONTACT1 组件的节点，在这个面上生成接触单元（单元类型改为 4），如图 10-67 所示。

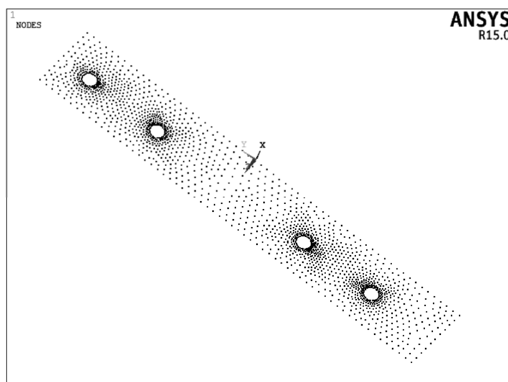


图 10-65　接触面的节点

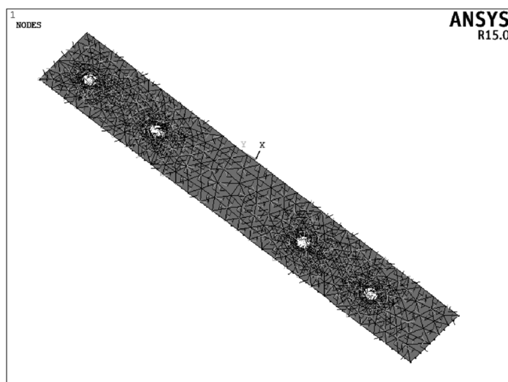


图 10-66　接触目标单元

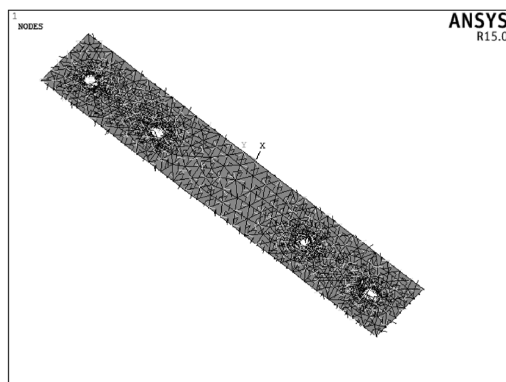


图 10-67　生成接触单元

42）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，选出用于模拟螺杆的 4 个圆

柱，如图 10-68 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Pretension>Pretensn Mesh>With Options>Divide at Valu>Elements in Volu 命令，拾取第一个螺杆，单击 OK 按钮弹出图 10-69 所示的 Mesh Pretension Section 对话框。

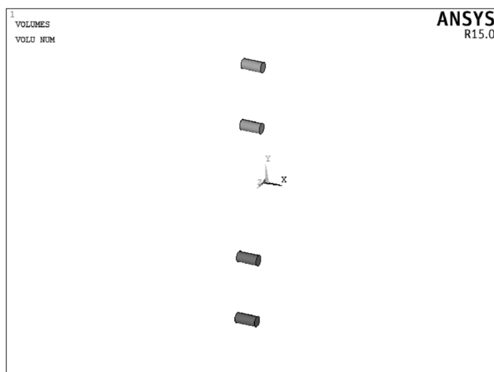


图 10-68 选出螺杆

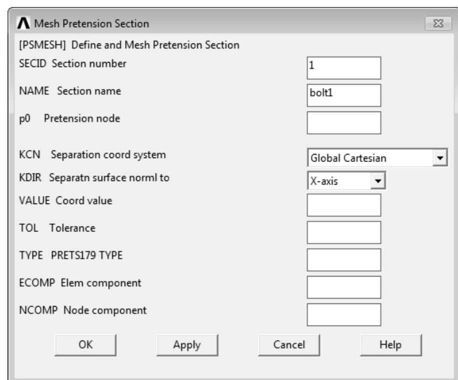


图 10-69 Mesh Pretension Section 对话框

输入预紧截面编号 1，定义名称为 BOLT1，单击 OK 按钮完成。重复上述操作，为 4 个螺杆定义预紧截面 BOLT1～BOLT4。

43）完成接触设置后，进入求解器。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 命令，设置分析类型为 Static。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 命令，在 Basic 选项卡中设置时间为 1，载荷子步数为 20，最大平衡迭代步数为 200。在 Nonlinear 选项卡中打开大变形开关。

44）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，选出 Z=0 的面，如图 10-70 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Symmetry B.C.> On Areas 命令，单击 Pick All 按钮，定义对称约束，如图 10-71 所示。

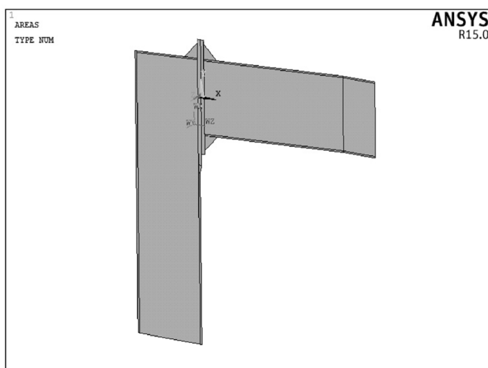


图 10-70 选出 Z=0 的面

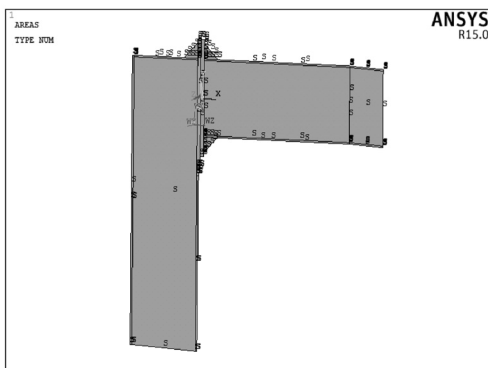
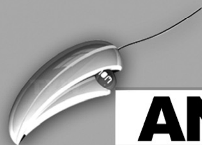


图 10-71 对称约束



在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，选择 Y=−(hb/2+lc+1)的节点，如图 10−72 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 命令，单击 Pick All 按钮，选择 All DOF 选项，完成柱底节点的约束，如图 10−73 所示。

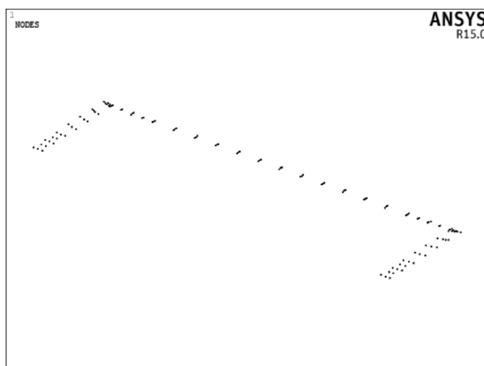


图 10−72 选择柱底节点

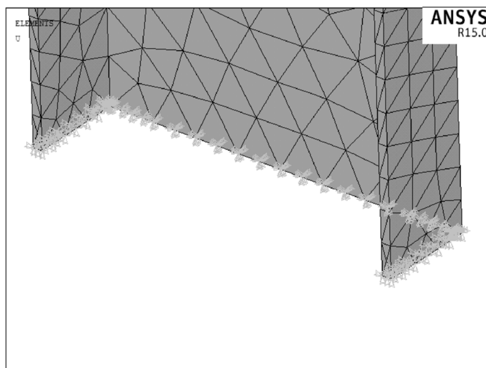


图 10−73 柱底节点的约束

45）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>PretnsnSectn 命令，弹出图 10−74 所示的 Pretension Section Loads 对话框。

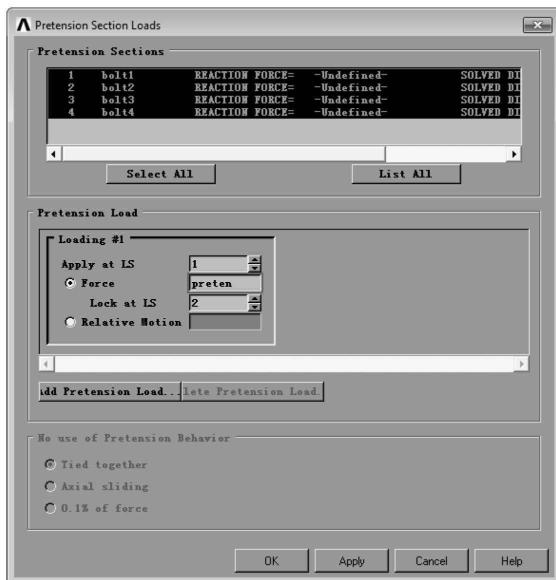


图 10−74 Pretension Section Loads 对话框

设置 Pretension Section Loads 对话框如图 10−74 所示，单击 OK 按钮完成预紧力的设置。

46）在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 10−75 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 10−76 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

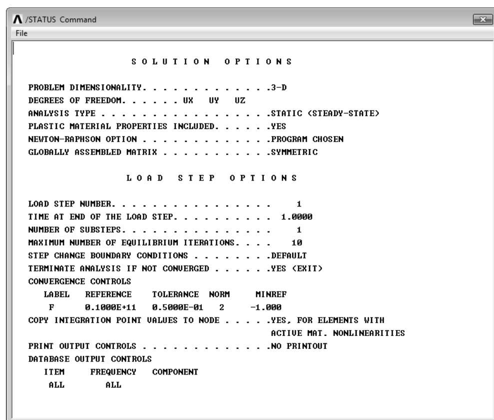


图 10-75 STATUS Command 窗口

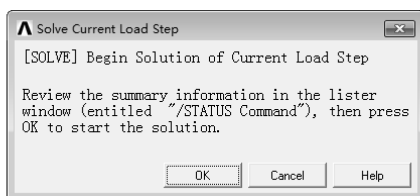


图 10-76 Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。

47）完成预紧力求解后，施加载荷。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>Restart 命令，重新开始分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 命令，在 Basic 选项卡中定义第二个载荷步时间为 2。定义载荷子步数为 20，打开自动时间步长的最小子步数为 20，最大子步数为 5000。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，使用按坐标选择选出位于 X=tep+lb1+lb2/2、Y=hb/2+(lb1+lb2/2)*randa、Z=0 的节点。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 命令，对该节点施加 UY 位移，值为 DISPLA。

48）在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 10-77 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 10-78 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

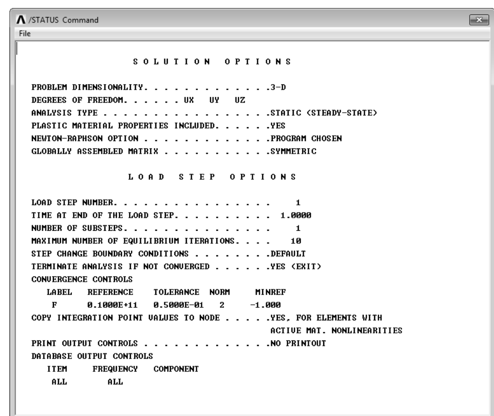


图 10-77 STATUS Command 窗口

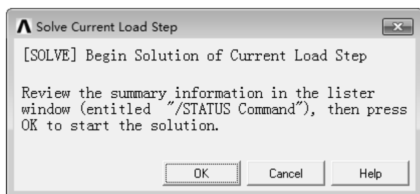


图 10-78 Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。

49）完成求解后，进入后处理。在工作区中显示节点位移解，如图 10-79 所示。

选出螺栓组，在工作区中显示螺栓的应力云图，如图 10-80 所示。

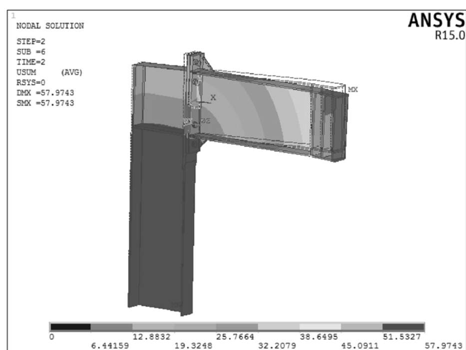


图 10-79　节点位移解

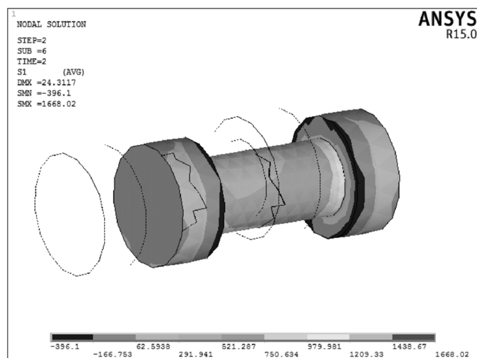


图 10-80　螺栓应力云图

选出梁端板，显示端板应力分布如图 10-81 所示，柱端板接触应力分析如图 10-82 所示。

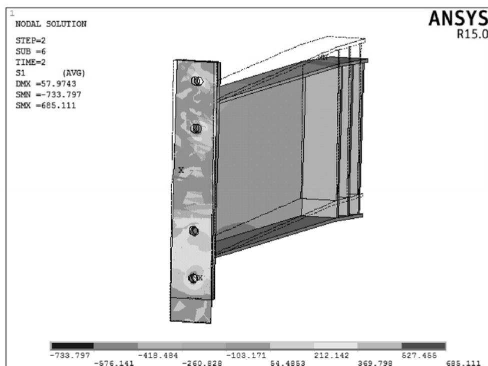


图 10-81　梁端板接触应力

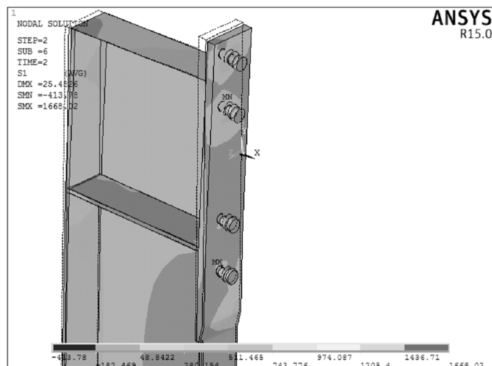


图 10-82　柱端板接触应力

梁端板接触反作用力如图 10-83 所示，柱端板接触反作用力如图 10-84 所示。

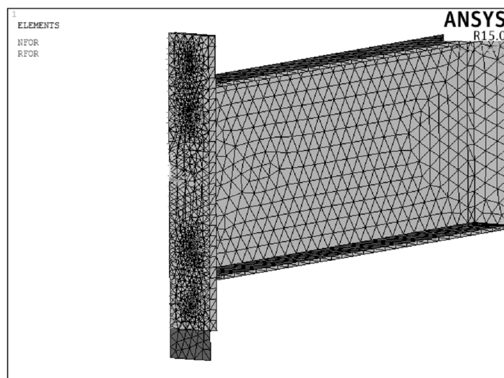


图 10-83　梁端板接触反力

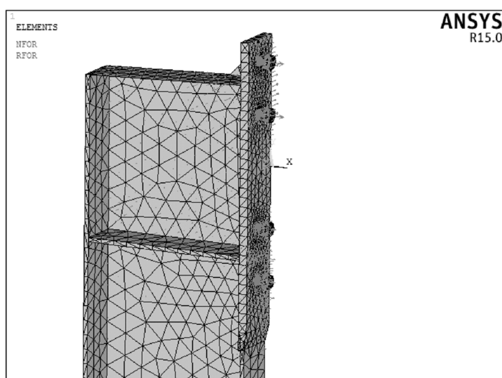


图 10-84　柱端板接触反力

柱底约束反力如图 10-85 所示，螺栓孔周围应力与接触反力分布如图 10-86 所示。

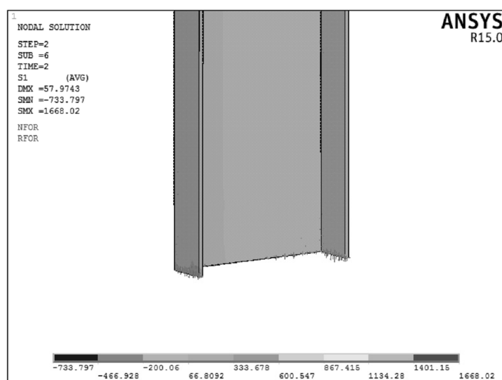


图 10-85　柱底约束反力

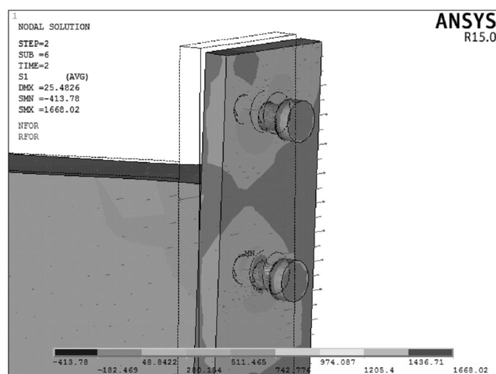


图 10-86　螺栓孔周围应力与接触反力

模型整体主应力分布如图 10-87 所示，剪应力云图如图 10-88 所示。

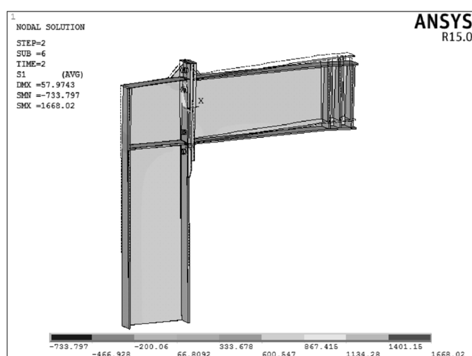


图 10-87　模型主应力

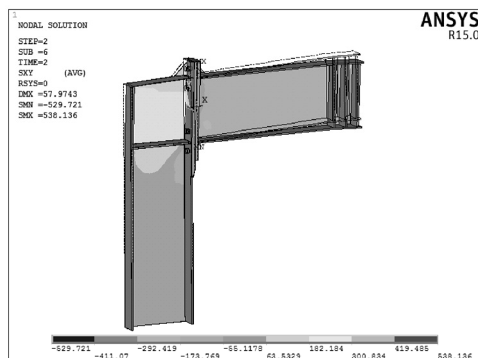


图 10-88　模型剪应力

10.3　复合材料分析

复合材料由一种以上具有不同结构性质的材料构成，它的主要优点是具有很高的比刚度（刚度与重量之比）。在工程应用中，典型复合材料有纤维和叠层型材料，如玻璃纤维、玻璃环氧树脂、石墨环氧树脂、硼环氧树脂等。

10.3.1　概述

复合材料作为结构应用已有相当长的历史。在现代，复合材料构件已被大量应用于飞行器结构、汽车、体育器材及许多消费产品中。

ANSYS 程序中提供了一种特殊单元——层单元来模拟复合材料。利用这些单元就可以进行任意的结构分析，包括非线性（如大挠度）和应力刚化等问题。对于热、磁、电场分析，目前尚未提供层单元。

与铁或钢等各向同性材料相比，建立复合材料的模型要复杂一些。由于各层材料性能为任意正交各向异性，材料性能与材料主轴取向有关，在定义各层材料的材料性能和方向时要特别注意。

1．单元类型

用于建立复合材料模型的单元类型有 SHELL99、SHELL91、SHELL181、SOLID46 和 SOLID191 五种单元。具体应选择哪一类单元要根据具体应用和所需计算结果类型等来确定。所有的层单元允许失效准则计算。

（1）SHELL99——线性层状结构壳单元

SHELL99 是一种 8 节点三维壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元主要适用于薄或中等厚度的板和壳结构，一般要求宽厚比应大于 10。对于宽厚比小于 10 的结构，则应考虑选用 SOLID46 来建立模型。SHELL99 允许有多达 250 层的等厚材料层，或者 125 层厚度在单元面内呈现双线性变化的不等材料层。如果材料层大于 250，用户可通过输入自己的材料矩阵形式来建立模型。还可以通过一个选项将单元节点偏置到结构的表层或底层。

（2）SHELL91——非线性层状结构壳单元

SHELL91 与 SHELL99 有些类似，只是它允许复合材料最多只有 100 层，而且用户不能输入自己的材料性能矩阵。但是，SHELL91 支持塑性、大应变行为以及一个特殊的“三明治”选项，而 SHELL99 则不能。另外 SHELL91 更适用于大变形的情况。

（3）SHELL181——有限应变壳单元

SHELL181 是 4 节点三维壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元支持所有的非线性功能（包括大应变），允许有多达 250 层材料层。应该通过截面命令，而不是实常数来定义层的信息，可以通过 FC 命令来指定失效准则。

（4）SOLID46——三维层状结构体单元

SOLID46 是 8 节点三维实体单元 SOLID45 的一种叠层形式，其每个节点有 3 个自由度（UX、UY、UZ）。它可用来建立叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许有多达 250 层的等厚材料层，或者 125 层的厚度在单元面内呈现双线性变化的不等厚材料层。

该单元的另一个优点是可以用叠加几个单元的方式来对多于 250 层的复合材料建立模型，并允许沿厚度方向的变形斜率连续。用户也可输入自己的本构矩阵。SOLID46 调整横向的材料特性，以允许在横向上为常应力。

与 8 节点壳单元相比较，SOLID46 的阶次要低些，因此，如在壳结构应用中要得到与 SHELL91 或 SHELL99 相同的求解精度，需要更密的网格。

（5）SOLID191——层状结构体单元

SOLID191 是 20 节点三维实体单元 SOLID95 的一种叠层形式，其每个节点有 3 个自由度（UX、UY、UZ）。它可用以建立厚的叠层壳或实体的有限元模型，每个单元允许有多达 100 层的材料层。与 SOLID46 类似，SOLID191 可以模拟厚度上的不连续。

SOLID46 可以调整横向的材料特性，以允许在横向上为常应力。这个单元不支持非线性材料或大挠度。

（6）除上述层单元外，还有其他的一些具有层功能的单元

SOLID95 是 20 节点的结构实体单元，在 KEYOPT(1)=1 时，其作用与单层的 SOLID191 单元类似，包括应用方位角和失效准则，还允许非线性材料和大挠度。

SHELL63 是 4 节点壳单元，可用于对“三明治”壳结构进行粗糙、近似的计算。如两块金属片之间夹有一层聚合物的问题就很典型，此时聚合物的弯曲刚度相对于金属片的弯曲刚度来说是一个小量。

用户可以用实常数 RMI 来修正单元的弯曲刚度，使其等效于由金属片引起的弯曲刚度。从中面到外层纤维的距离（实常数 CTOP 和 CBOT）可用来获得“三明治”壳的表层输出应力。

SOLID65 是三维钢筋混凝土实体单元，可以模拟在 3 个指定方向配筋的各向同性介质。

BEAM188 和 BEAM189 为三维有限应变梁单元，其截面可以包含多种材料。

2．定义材料层

复合材料最重要的特征就是其叠层结构。每层材料都有可能由不同的正交各向异性材料构成，并且其主方向也可能各不相同。对于叠层复合材料，纤维的方向决定了层的主方向。有两种方法可用来定义材料层的配置：

1）通过定义各层材料的性质。

2）通过定义表示宏观力、力矩与宏观应变、曲率之间相互关系的本构矩阵（只适合于 SOLID46 和 SHELL99）。

定义各层材料的性质的方法由下到上一层一层定义材料层的配置。底层为第一层，后续的层沿单元坐标系的 Z 轴正方向自底向上叠加。如果叠层结构是对称的，可以只定义一半的材料层。

有时，某个物理层可能只延伸到模型的一部分。为了建立连续的层，可以把这些中断的层的厚度设置为零，如图 10-89 所示的四层模型，其中第二层在某处中断了。

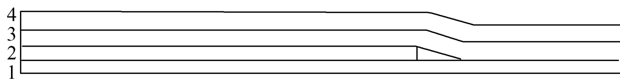


图 10-89 四层复合材料模型

对于每一层材料，由单元实常数表（MaimMenu> Preprocessor> Real Constants）定义如下性质：

- 材料性质（通过材料参考号 MAT 来定义）。
- 层的定向角（THETA）。
- 层的厚度（TK）。

分层的截面可以通过截面工具来定义（Prep> Sections> Shell-Add/Edit）。对每一层，通过截面命令或截面工具（SECTYPE，SECDATA）定义下面的属性：

- 材料性质（通过材料参考号 MAT 来定义）。
- 层的定向角（THETA）。
- 层的厚度（TK）。
- 每层积分点的数目（NUMPT）。

材料性质与其他单元一样用 MP 命令 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models> Structural Implicit> Linear> Elastic> Isotropic 或 Orthotropic）定义线性材料特性，用 TB 命令定义非线性数据表（塑性仅可以用于 SOLID191 和 SHELL91 单元）。唯一不同是，

复合材料单元的材料参考号由其实常数表来指定。对于层单元，MAT 命令（MainMenu> Preprocessor> -Meshing-Attributes>DefaultAttribs）属性仅用于 MP 命令的 DAMP 和 REFT 参数。各层的线性材料特性可以是各向同性，也可以是正交异性，典型的纤维加强复合材料包括各向异性材料，且这些特性主要以主泊松比的形式提供。

层的定向角定义层坐标系相对于单元坐标系的角度。它是这两个坐标系的 X 轴之间的夹角（单位为“度”）。默认情况是层坐标系与单元坐标系平行。所有单元都有默认的坐标系，可用 ESYS 命令（MainMenu> Preprocessor> Attributes>DefaultAttribs）来改变。用户还可用自己的子程序来定义单元和层坐标系。

如果层的厚度是常数，用户只需定义节点 I 处的厚度 TK（I），否则 4 个角节点处的厚度都需输入。中断的层必须为零厚度。

每层的积分点数目用于确定计算结果的详细程度。对于非常薄的层，当其和很多其他层一起使用时，有一个积分点就足够了。但对于层数很少的片状结构，需要的积分点就应该比较多，默认为 3。本特性仅适用于通过截面命令定义的截面。

定义本构矩阵是定义各层材料性质的另一种方式，适用于 SOLID46 和 SHELL99（通过设置其 KEYOPT（2））。该矩阵表示了单元的力-力矩与应变-曲率的关系，必须在 ANSYS 外进行计算。它们可以通过 KEYOPT（1）设置为求解输出的一部分。这种方法的主要优点是：

- 允许用户合并聚合复合材料的性质。
- 支持热载荷向量。
- 可表示层数无限制的材料。

矩阵的元素作为实常数来定义。通过定义单元平均密度（实常数 AVDENS）还可以将质量影响考虑进去。但是，使用了这种方法时，由于没有输入每层材料各自的信息，就不能得到每层材料的详细结果。

3．失效准则

失效准则用于获知在所加载荷下，各层是否失效。用户可从 3 预定义好了的失效准则中选择失效准则，或者自定义多达 6 种的失效准则。3 种预定义失效准则是：

- 最大应变失效准则，它允许有 9 个失效应变。
- 最大应力失效准则，它允许有 9 个失效应力。
- Tsai-Wu 失效准则，它允许有 9 个失效应力和 3 个附加的耦合系数。

失效应变、应力和耦合系数可以是与温度相关的。

定义失效准则需要注意如下问题。

- 失效准则是正交各向异性的，因此用户必须输入所有方向上的失效应力或失效应变值（在压缩值等于拉伸值时例外）。
- 如果不希望在某个特定的方向上检查失效应力或失效应变，则在那个方向上定义一个大值（如前面命令流中那样）。
- 用户可通过用户子程序 USRFC1 到 USRFC6 自定义失效准则。这些子程序应事先与 ANSYS 程序作链接。

在复合材料单元的建模和后处理中，一些附加规则如下。

复合材料会体现出几种类型的耦合效应，诸如弯扭耦合、拉弯耦合等。这是由具有不同

性质的多层材料互相重叠引起的。其结果是，如果材料层的积叠顺序是非对称的，则即使模型的几何形状和载荷都是对称的，也不能按照对称条件只求解一部分模型，因为结构的位移和应力可能不对称。

在模型自由边界上的层间剪切应力通常都是很重要的。要求得在这些部位相对精确的层间剪切应力，则模型边界上的单元尺寸应约等于总的叠层厚度。对于壳来说，增加实际材料层数并不一定提高层间剪切应力的求解精度。但是，如果用 SOLID46、SOLID95、SOLID191 单元，则沿厚度方向上的叠加单元会使得沿厚度方向上层间应力的求解更为精确。壳单元的层间横向剪应力的计算基于单元上下表面不承受应力的假设。这些层间剪应力只在单元的中心处计算，而不是沿着单元边界。建议使用壳-实体子模型精确计算自由边的层间应力。

因为复合材料的求解需要大量的输入数据，故在进行求解之前应对这些数据进行检验。

10.3.2 复合材料梁的分析

本例将对一个由复合材料制作的工字梁进行分析。

如图 10-90 所示，有一长 3m 的工字梁，高度为 0.3m，上下翼缘的宽度为 0.2m。材料为 T300/5208，是 20 层对称分布叠层板，每层的厚度为 0.001m，各层的方向角分别为 0°、45°、90°、-45°、0°、0°、45°、90°、-45°和 0°，材料特性为：EX=181GPa，EY=EZ=10.3GPa，GXY=7.17GPa，GYZ=3.87GPa，μ_{12}=0.016；轴向强度：σ_{X+}=1500MPa，σ_{X-}=1500MPa，σ_{Y+}=40MPa，σ_{Y-}=246MPa，σ_{Z+}=40MPa，σ_{Z-}=246MPa，τ_{XY}=68MPa（+表示受拉，-表示受压）。工字梁一端固定，另一端受集中力分别为：100N、10000N 和 100N。计算工作应力和应变、失效应力和失效层等。

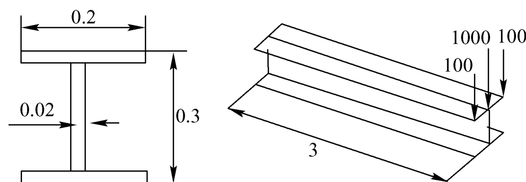


图 10-90 模型示意图

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。设置参数、工作目录、工作名称，单击 Run 按钮进入 ANSYS 15.0 GUI 界面。

2）在 GUI 界面选择 Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete 命令，单击 Add 按钮，弹出图 10-91 所示的 Library of Element Types 对话框，选择单元类型为 SHELL181。

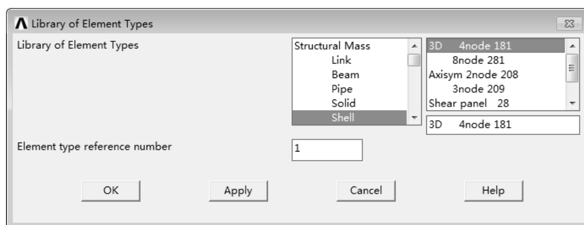


图 10-91 Library of Element Types 对话框

回到 Element Types 对话框，选中 SHELL181 单元，单击 Options 按钮，弹出图 10-92 所示的 SHELL181 element type options 对话框，设置如图 10-92 所示。

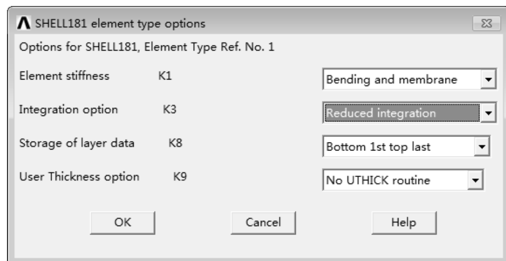
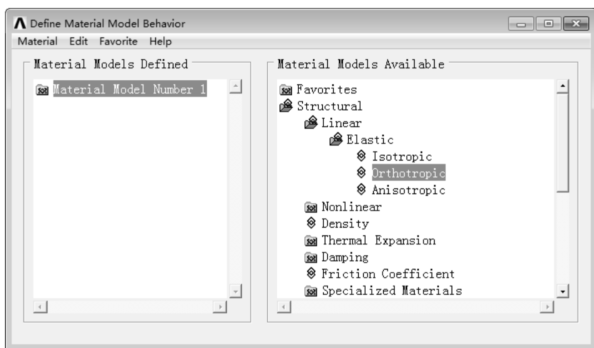


图 10-92　SHELL181 element type options 对话框

3）接下来定义材料模型。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models 命令，弹出图 10-93 所示的 Define Material Model Behavior 对话框。

选线弹性、各向异性材料，弹出图 10-94 所示的 Linear Orthotropic Properties for Material Number 1 对话框，输入材料参数如图 10-94 所示。



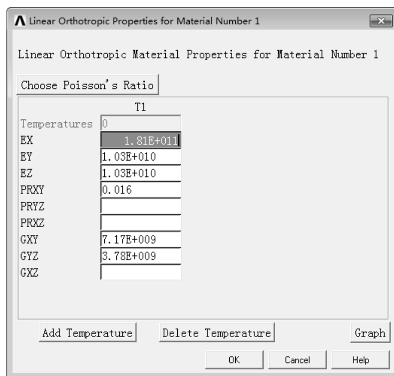


图 10-93　Define Material Model Behavior 对话框　　　　图 10-94　各向异性材料参数

4）完成单元类型与材料模型定义后，定义壳的厚度。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor>Sections>Shell>Lay-up>Add / Edit 命令，弹出图 10-95 所示的 Create and Modify Shell Sections 对话框。

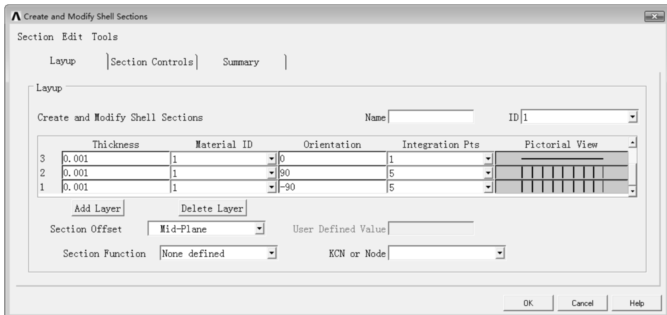


图 10-95　Create and Modify Shell Sections 对话框

单击 Add Layer 按钮，添加 20 个层，定义每层的厚度与方向解，如图 10−95 所示。

5）运行如下命令进行强度参数的定义。

```
TB，FAIL，1
TBTEMP，，CRIT
TBDATA，1，0，0，1
TBTEMP，20
TBDATA，10，1500E6
TBDATA，11，-1500E6
TBDATA，12，40E6
TBDATA，13，-246E6
TBDATA，14，40E6
TBDATA，15，-246E6
TBDATA，16，68E6
```

6）完成材料参数定义后，开始模型的建立。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create>Keypoints> In Active CS 命令，弹出图 10−96 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，输入 1 号关键点的坐标（0，0，0），单击 Apply 按钮，继续输入关键点坐标，直至完成表 10−9 所示的关键点坐标的输入。

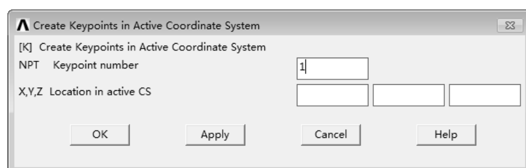


图 10−96　在全局坐标中定义关键点

表 10−9　关键点坐标

关键点编号	X	Y	Z
1			
2	3		
3	3	0.3	
4	0	0.3	
5	0	0	0.1
6	3	0	0.1
7	3	0	−0.1
8	0	0	−0.1
9	0	0.3	0.1
10	3	0.3	0.1
11	3	0.3	−0.1
12	0	0.3	−0.1

完成定义的关键点如图 10−97 所示。

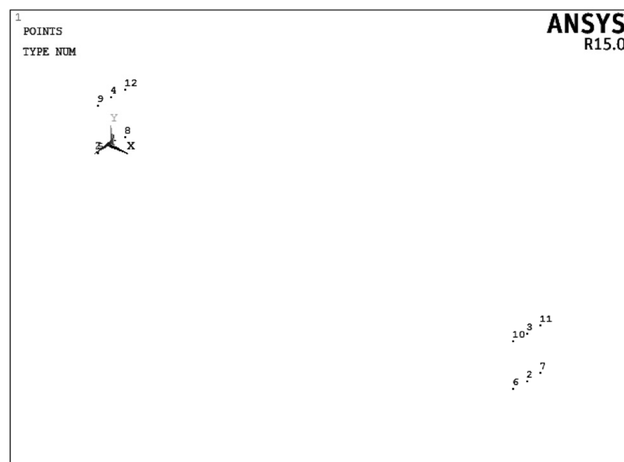


图 10-97　定义关键点

7）完成关键点定义后，将关键点围成面。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Arbitrary> Through KPs 命令，拾取 1～4 号关键点，连接成为面。

继续生成面，将 5～8 关键点，9～12 关键点分别连接成面，完成的模型如图 10-98 所示。

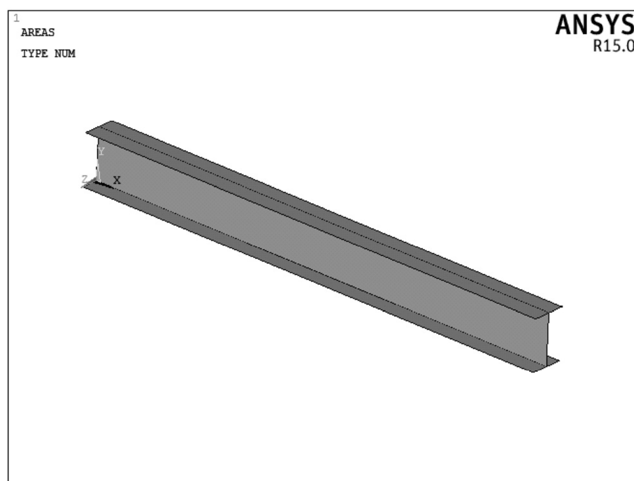


图 10-98　生成面模型

8）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans> Partition> Areas 命令，选中工作区中的所有面，单击 OK 按钮完成面的搭接。

9）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Size Cntrls>ManualSize> Global> Size 命令，弹出图 10-99 所示的 Global Element Sizes 对话框，设置单元尺寸为 0.1，单击 OK 按钮完成单元尺寸定义。

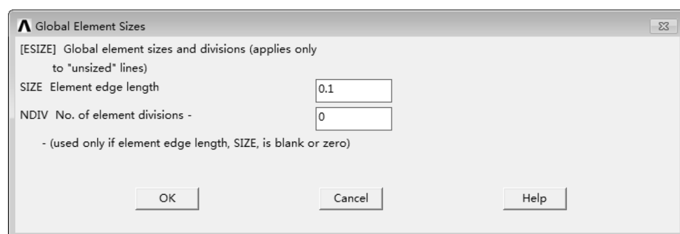


图 10-99　Global Element Sizes 对话框

10）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Areas> Mapped> 3 or 4 sided 命令，拾取工作区中的全部面，单击 OK 按钮完成网格划分，如图 10-100 所示。

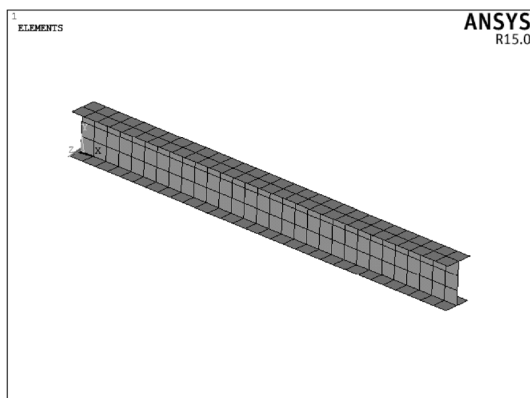


图 10-100　划分网格

11）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Size and Shape 命令，弹出图 10-101 所示的 Size and Shape 对话框。

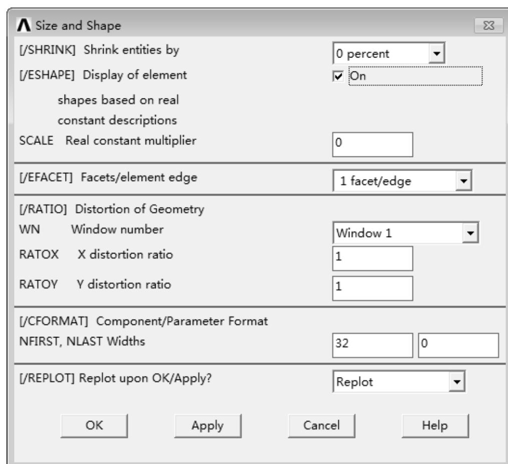


图 10-101　Size and Shape 对话框

勾选/ESHAPE 选项，单击 OK 按钮，在工作区中显示单元的厚度，如图 10-102 所示，分层的细节如图 10-103 所示。

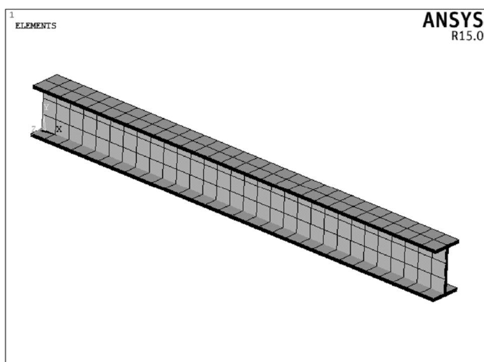


图 10-102 显示单元厚度

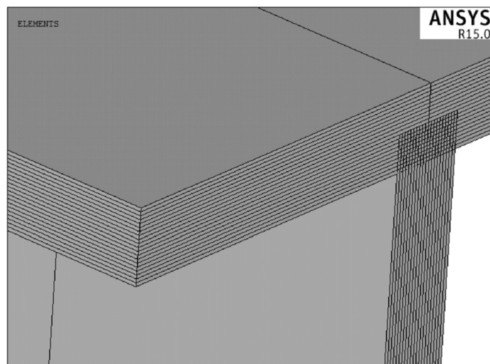


图 10-103 分层细节

12）进入求解器，在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，使用 Select Entities 对话框选出 X=0 的节点，如图 10-104 所示。

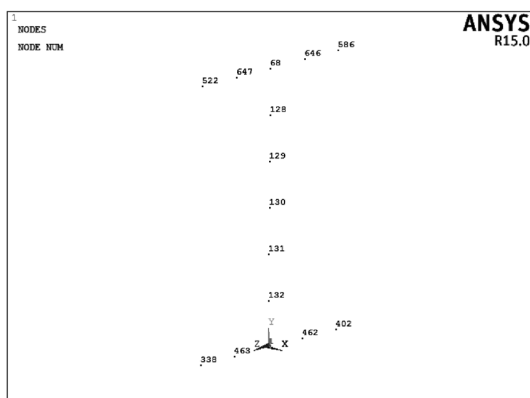


图 10-104 选出端面节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 命令，拾取工作区的全部节点，弹出图 10-105 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。

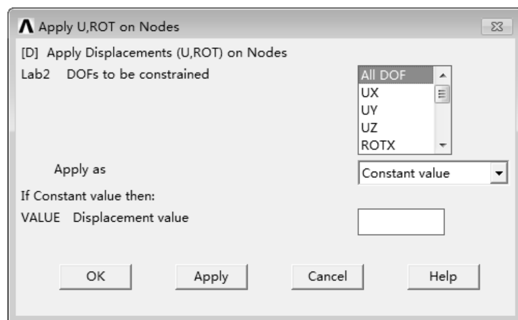


图 10-105 Apply U，ROT on Nodes 对话框

选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮，完成约束如图 10-106 所示。

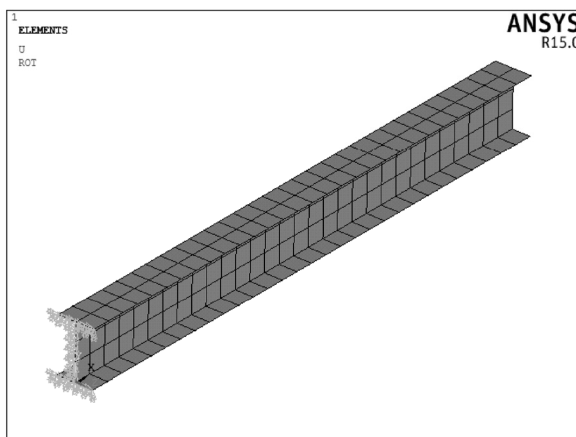


图 10-106　完成约束

13）进入求解器，在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，使用 Select Entities 对话框选出 X=3、Y=0.3、Z=0 的节点。注意应使用 Reselect。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Force/Moment> On Nodes 命令，定义载荷为 FY=−10000。

然后使用 Select Entities 对话框选出 X=3、Y=0.3、Z=0.1 的节点。注意应使用 Reselect。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Force/Moment> On Nodes 命令，定义载荷为 FY=−100。

然后使用 Select Entities 对话框选出 X=3、Y=0.3、Z=−0.1 的节点。注意应使用 Reselect。在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Define Loads> Apply> Structural> Force/Moment> On Nodes 命令，定义载荷为 FY=−100。

完成载荷定义如图 10-107 所示。

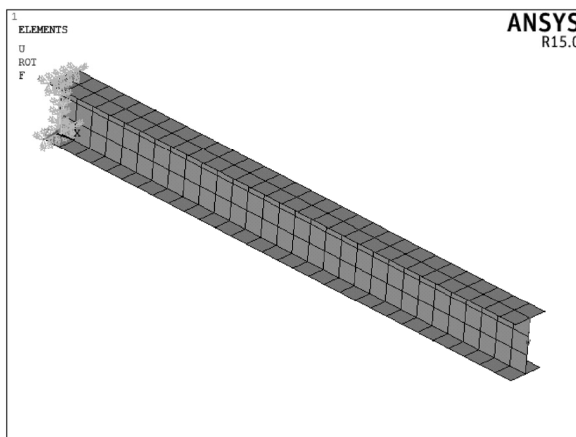
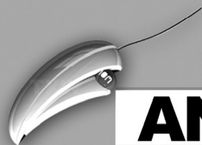


图 10-107　完成载荷定义



14）在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 10-108 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 10-109 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

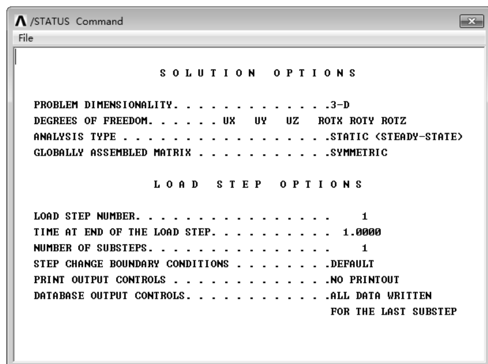


图 10-108　STATUS Command 窗口

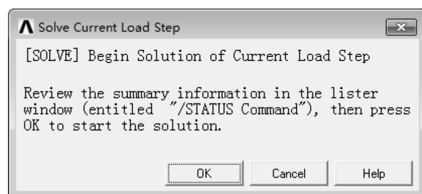


图 10-109　Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的“OK”按钮开始求解，当弹出 Solution is done! 提示时，求解完成。

15）完成求解后用户即可进入通用后处理器进行处理分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results>Deformed Shape…命令，弹出图 10-110 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在图 10-110 所示的 Plot Deformed Shape 对话框中选择 Def+undef edge 选项，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示如图 10-111 所示的变形图。

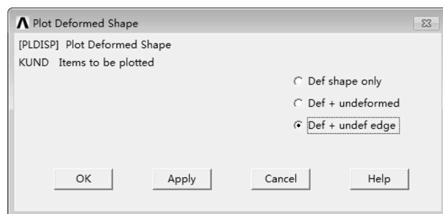


图 10-110　Plot Deformed Shape 对话框

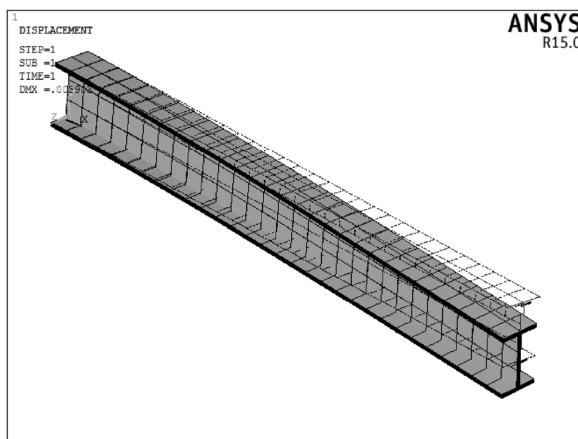


图 10-111　变形图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 10-112 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中

看到位移云图，如图 10-113 所示。同样的方法显示项目的节点解如图 10-114～图 10-117 所示。

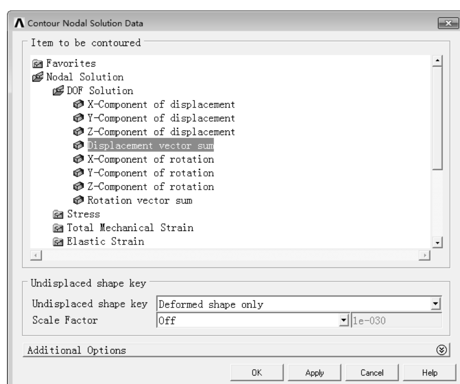


图 10-112 Contour Nodal Solution Data 对话框

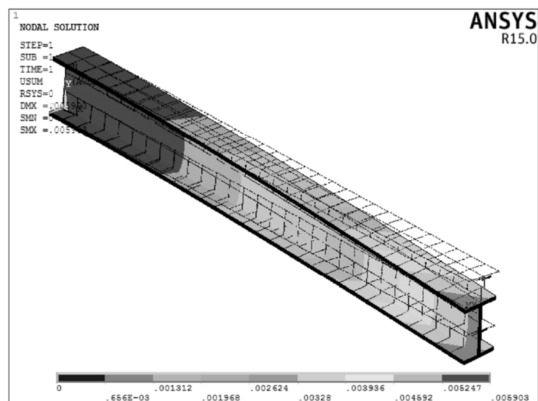


图 10-113 位移云图

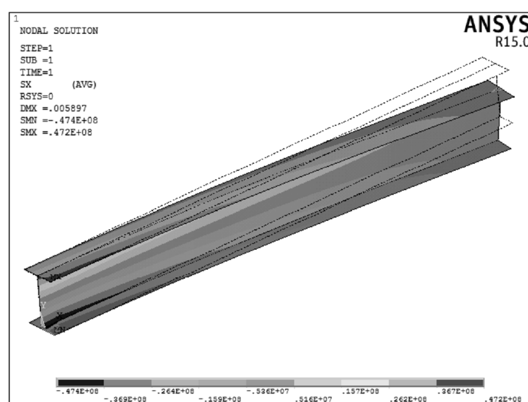


图 10-114 X 方向应力云图

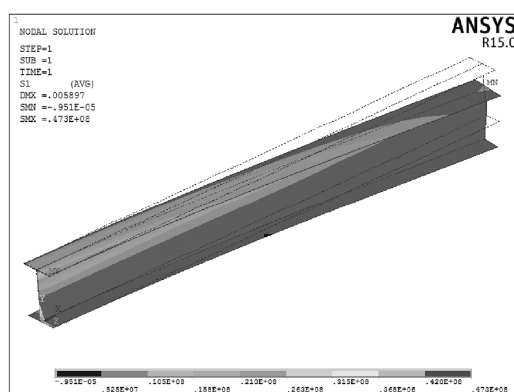


图 10-115 第一主应力云图

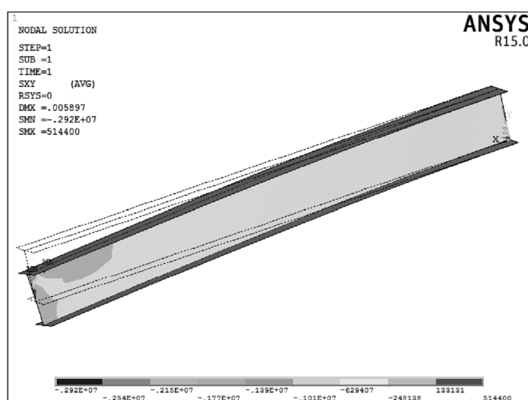


图 10-116 XY 剪应力云图

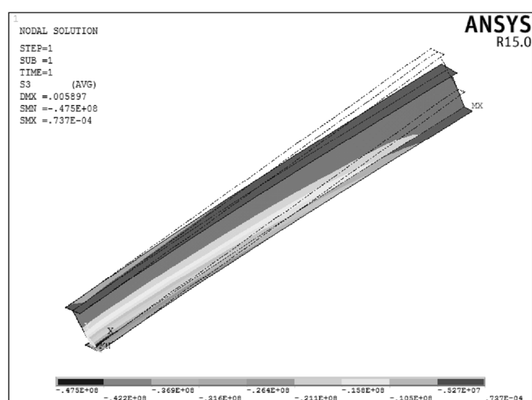


图 10-117 第三主应力云图

16）运行如下后处理命令。

```
ETABLE，NX，SMISC，7
ETABLE，FC，NMISC，1
ETABLE，FCMC，NMISC，2
ETABLE，FCLN，NMISC，3
ETABLE，ILMX，NMISC，4
ETABLE，ILLN，NMISC，5
PRETAB，NX，ILLN，ILMX
PRETAB，FC，FCLN，FCMX
```

弹出如图 10-118 和图 10-119 所示的单元列表。

```
PRETAB  Command
File

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT

 ***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

   STAT    CURRENT     CURRENT
   ELEM    FC          FCLN
      1   3.0000      20.000
      2   3.0000      20.000
      3   3.0000      20.000
      4   3.0000      20.000
      5   3.0000      20.000
      6   3.0000      20.000
      7   3.0000      20.000
      8   3.0000      20.000
      9   3.0000      20.000
     10   3.0000      20.000
     11   3.0000      20.000
     12   3.0000      20.000
     13   3.0000      20.000
     14   3.0000      20.000
     15   3.0000      20.000
```

图 10-118　单元列表（一）

```
PRETAB  Command
File

PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT

 ***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****

   STAT    CURRENT     CURRENT     CURRENT
   ELEM    NX          ILLN        ILMX
      1  -79.224      7.0000      95075.
      2  -51.783      12.000      74413.
      3  -91.815      12.000      68913.
      4  -139.87      7.0000      68715.
      5  -174.68      7.0000      68860.
      6  -203.34      7.0000      68091.
      7  -228.25      7.0000      67127.
      8  -250.62      8.0000      66156.
      9  -270.91      8.0000      65502.
     10  -289.37      8.0000      64715.
     11  -306.19      8.0000      63806.
     12  -321.52      8.0000      62785.
     13  -335.51      8.0000      61662.
     14  -348.27      8.0000      60446.
     15  -359.91      8.0000      59145.
```

图 10-119　单元列表（二）

10.4　大变形问题

本节将进行一个两块钢板压一个圆盘的非线性分析，如图 10-120 所示。

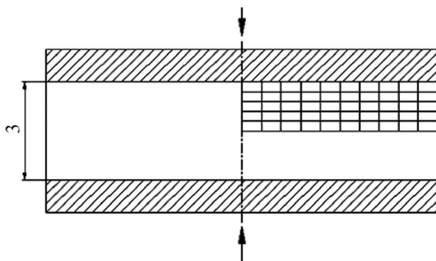


图 10-120　几何模型示意图

由于上下两块钢板的刚度比圆盘的刚度大得多，钢板与圆盘壁面之间的摩擦足够大。因此，在建模时只建立圆盘的模型即可。

用轴对称单元模拟圆盘，求解通过单一载荷步来实现。由于模型和载荷的上下对称性，只需建立圆盘的上半部分模型即可。

由于钢板的刚度很大，因此在建模时将圆盘上面节点的 Y 方向上的位移耦合起来。又由于钢板与圆盘壁面之间的摩擦足够大，圆盘与钢板之间不会产生滑动，因此将圆盘上面节点的 X 方向的位移约束起来。

10.4.1 问题描述

模型的材料参数如表 10-10 所示

表 10-10 材料参数

弹性模量	1000
泊松比	0.35
屈服强度	1
剪切模量	2.99

10.4.2 分析过程

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。

在 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口中设置 Simulation Environment 为 ANSYS，Lisence 为 ANSYS Multiphysics，在 Working Directory 中输入工作目录名称，在 Job Name 输入项目名称 10-4。单击 Run 按钮，进入 GUI 界面。

2）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Element Type> Add/Edit/Delete 命令，单击 Add 按钮，弹出图 10-121 所示的 Library of Element Types 对话框。

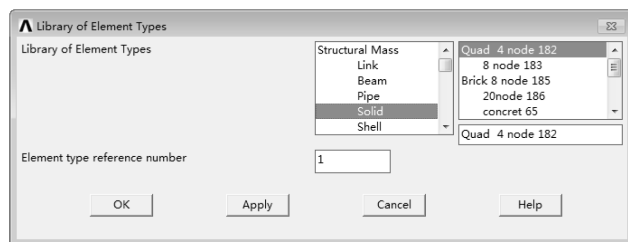


图 10-121 Library of Element Types 对话框

选择 PLANE182 单元，如图 10-121 所示。回到 Element Types 对话框，单击 Option 按钮，弹出图 10-122 所示的 PLANE182 element type options 对话框。

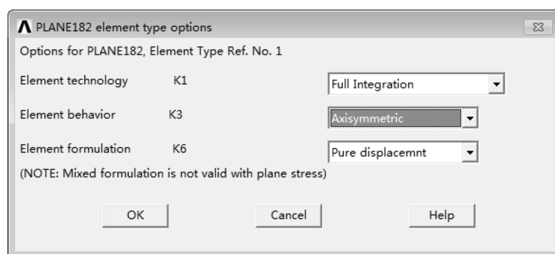


图 10-122 PLANE182 element type options 对话框

设置 Element behavior 为 Axisymmetric，即将单元设置为轴对称单元。

3）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Material Props> Material Models 命令，弹出图 10-123 所示的 Define Material Model Behaior 对话框，选择线弹性各向同性材料，弹出图 10-124 所示的 Linear Isotropic Properties for Material Number 1 对话框，设置弹性模量与泊比。

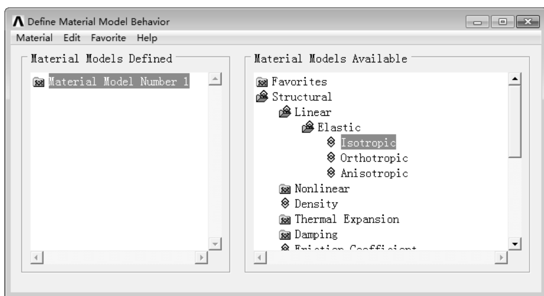


图 10-123　Define Material Model Behaior 对话框

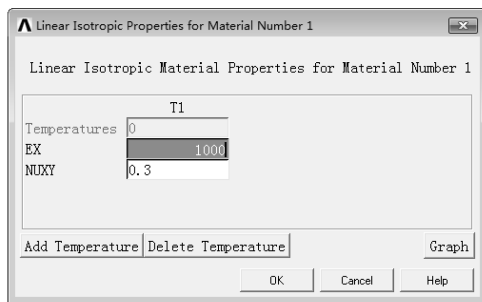


图 10-124　材料参数

4）回到 Define Material Model Behaior 对话框，选择 Structural>Nolinear> Inelastic> Rate Independent> Isotropic Harding Plasticity> Mises Plasticity> Bilinear 模型，在 Define Material Model Behaior 对话框中的位置如图 10-125 所示。

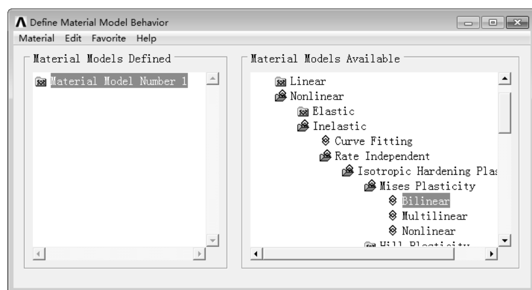


图 10-125　Define Material Model Behaior 对话框

设置屈服强度与剪切模量，如图 10-126 所示。

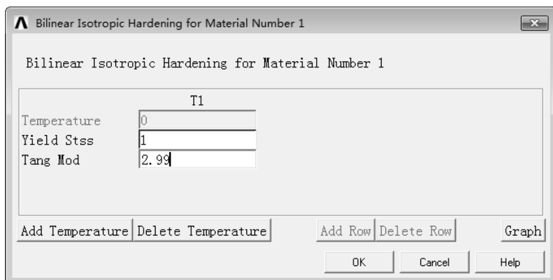


图 10-126　材料参数

5）在 GUI 界面选择 Main Menu> Preprocessor> Modeling> Create> Areas> Rectangle> By Dimensions 命令，弹出图 10-127 所示的 Create Rectangle by Dimensions 对话框，输入矩形两

个角点坐标如图 10-127 所示。

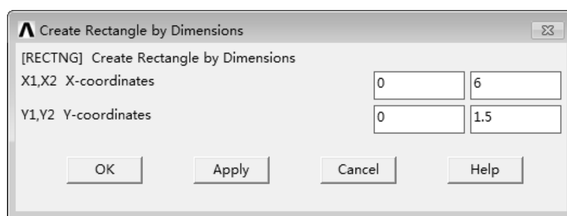
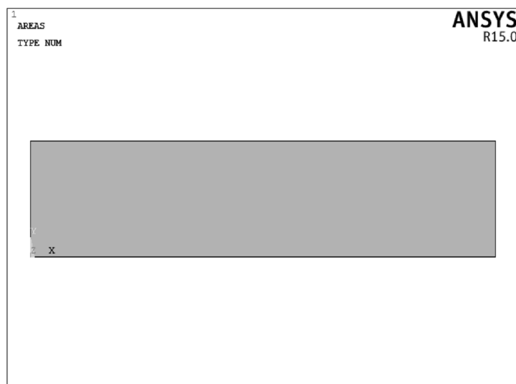


图 10-127　Create Rectangle by Dimensions 对话框

单击 OK 按钮后生成一个矩形如图 10-128 所示。

6）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Plot Ctrls> Numbering 命令，弹出图 10-129 所示的 Plot Numbering Controls 对话框。



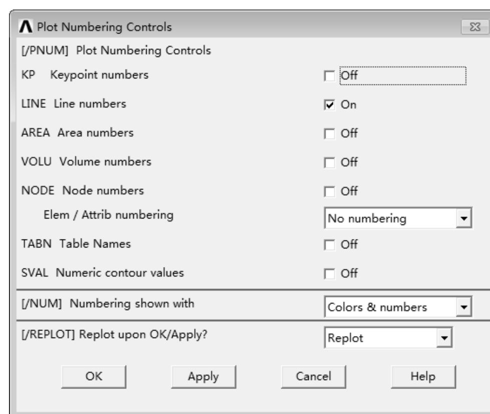
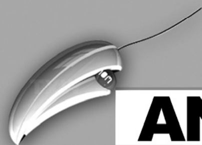


图 10-128　生成矩形　　　图 10-129　Plot Numbering Controls 对话框

勾选 Line numbers，单击 OK 按钮，在工作区中显示线编号如图 10-130 所示。



图 10-130　显示线编号



7）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>Picked Lines 命令，拾取 1 号线，单击 OK 按钮，弹出图 10-131 所示的 Element Sizes on Picked Lines 对话框。

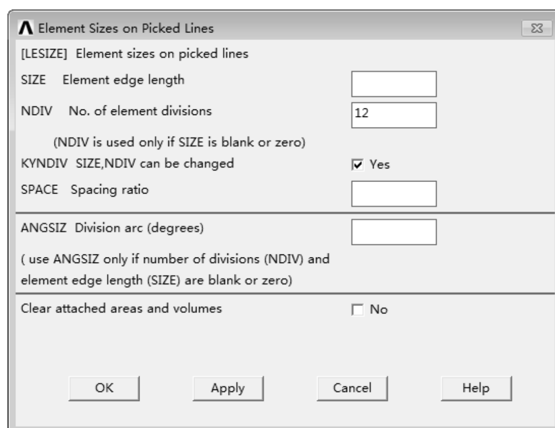
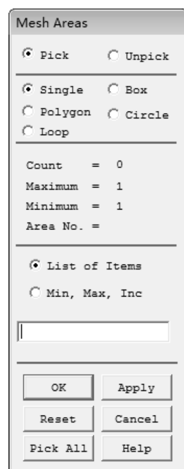


图 10-131　Element Sizes on Picked Lines 对话框

设置线 1 的划分份数为 12，单击 OK 按钮完成。重复上述操作，将 2 号线设置为划分 5 份。

8）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Meshing> Mesh> Areas> Mapped> 3 or 4 sided 命令，弹出图 10-132 所示的 Mesh Areas 对话框，选中工作区中的矩形，单击 OK 按钮，完成划分的模型如图 10-133 所示。



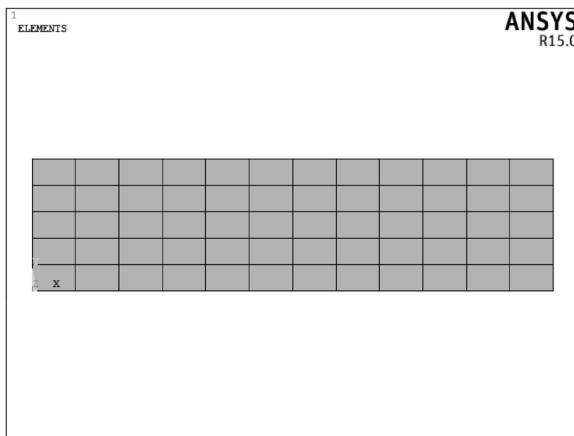


图 10-132　Mesh Areas 对话框

图 10-133　完成划分

9）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，弹出图 10-134 所示的 Select Entities 对话框，设置如图，选中 Y=1.5 的节点。选出的节点如图 10-135 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> Preprocessor> Coupling / Ceqn> Couple DOFs 命令，单击 Pick All 按钮，弹出图 10-136 所示的 Define Coupled DOFs 对话框。

完成耦合自由度设置的节点如图 10-137 所示。

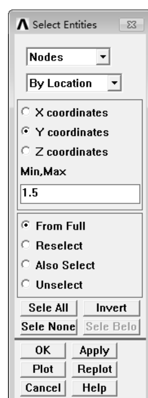


图 10-134　Select Entities 对话框

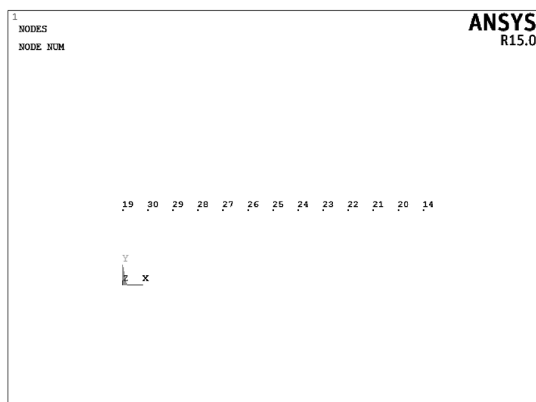


图 10-135　选出的节点



图 10-136　Define Coupled DOFs 对话框

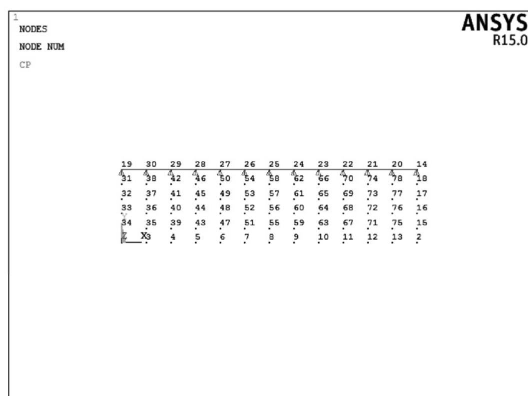


图 10-137　耦合自由度

10）完成有限元模型建立后进入求解器，在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，弹出图 10-138 所示的 Select Entities 对话框，设置如图所示，选中 X=0 的节点。选出的节点如图 10-139 所示。



图 10-138　Select Entities 对话框

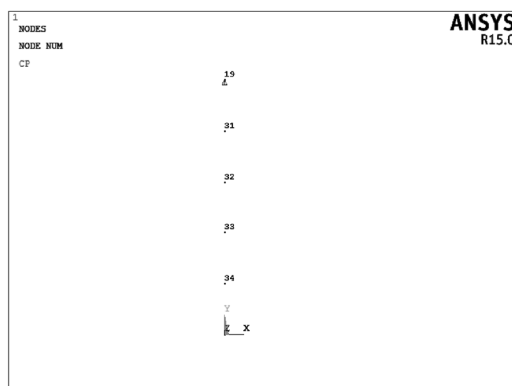


图 10-139　选出的节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>Symmetry B.C.> On Nodes 命令，弹出图 10-140 所示的 Apply SYMM on Nodes 对话框。

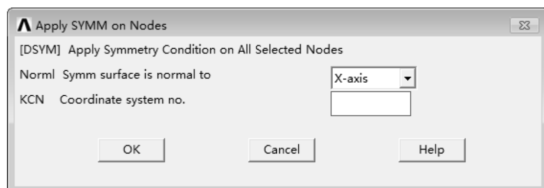


图 10-140　Apply SYMM on Nodes 对话框

设置对称方向为 X 轴，即以 Y 轴为对称轴。在这里设置的是对称轴的法向，设置完成如图 10-141 所示。重复操作，选出 Y=0 的节点，设置以 X 轴为对称轴的对称约束，完成约束如图 10-142 所示。

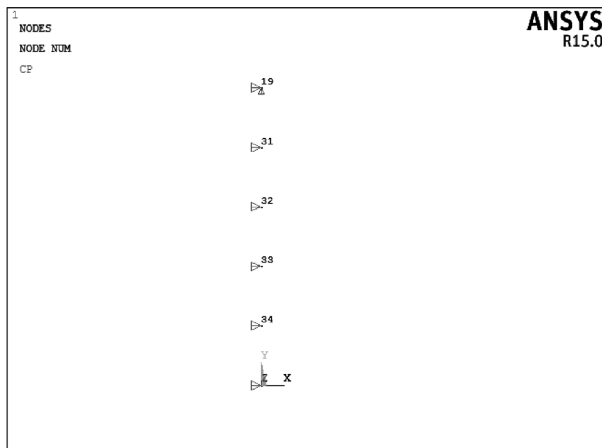


图 10-141　对称约束

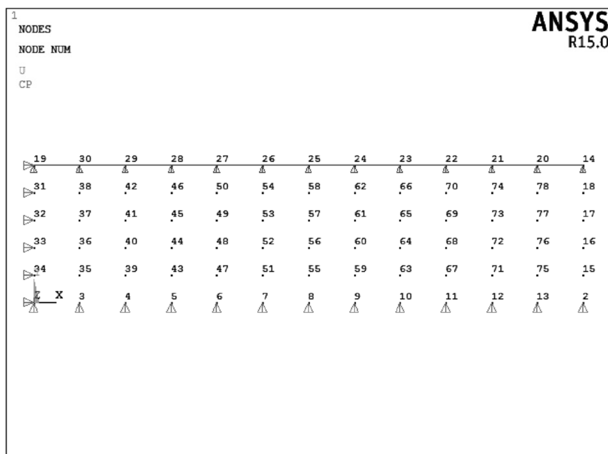


图 10-142　完成约束

11）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Select> Entities 命令，弹出图 10-143 所示的 Select Entities 对话框，设置如图所示，选中 Y=1.5 的节点。选出的节点如图 10-144 所示。

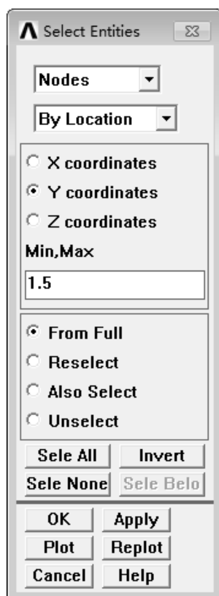


图 10-143 Select Entities 对话框

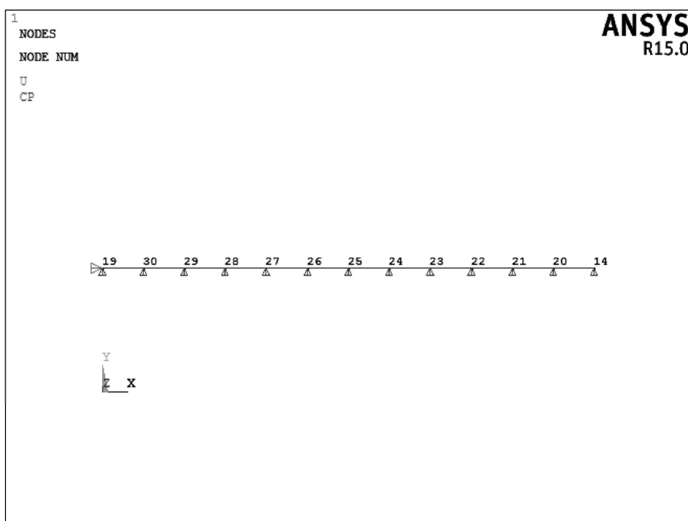


图 10-144 选出的节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement> On Nodes 命令，单击 Pick All 按钮，弹出图 10-145 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。

设置约束为 UY，单击 OK 按钮完成。完成的约束如图 10-146 所示。

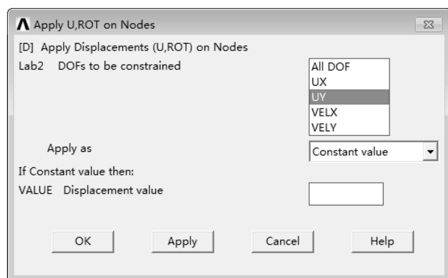


图 10-145 Apply U, ROT on Nodes 对话框

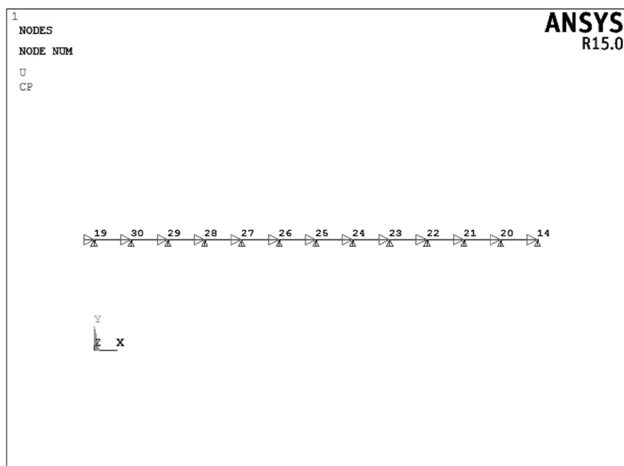


图 10-146 完成约束

12）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Analysis Type> Sol'n Controls 命令，弹出图 10-147 所示的 Solution Controls 对话框，在 Basic 选项卡中设置如图 10-147 所示。

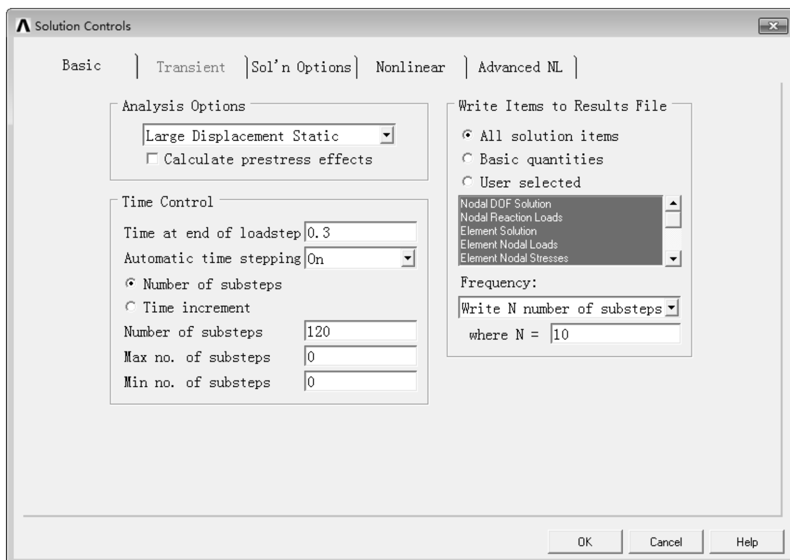


图 10-147　Solution Controls 对话框（Basic 选项卡）

打开 Nolinear 选项卡，设置如图 10-148 所示。完成设置后单击 OK 按钮。

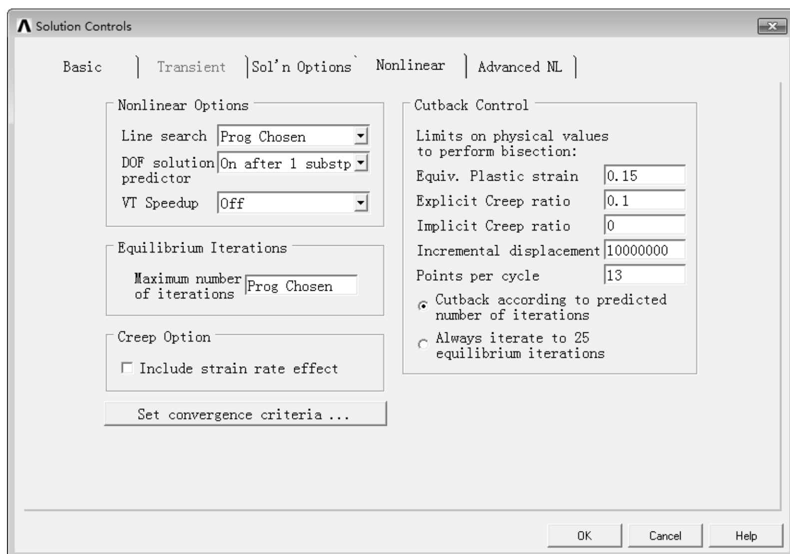


图 10-148　Solution Controls 对话框（Nolinear 选项卡）

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement> On Nodes 命令，输入节点号 14，单击 OK 按钮弹出图 10-149 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。

设置定义位移的方向为 UY，输入位移值-0.3，单击 OK 按钮。此时完成全部边界条件定义的模型如图 10-150 所示。

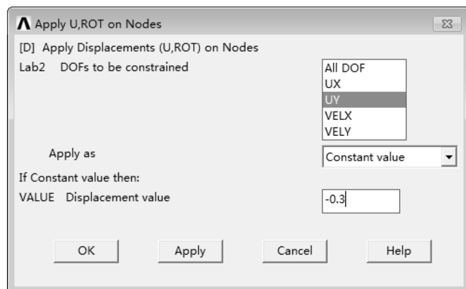


图 10-149 Apply U，ROT on Nodes 对话框

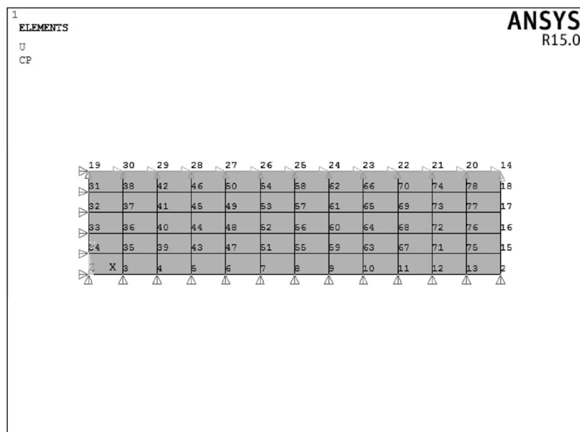


图 10-150 完成边界定义

13）在 GUI 界面选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 10-151 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 10-152 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

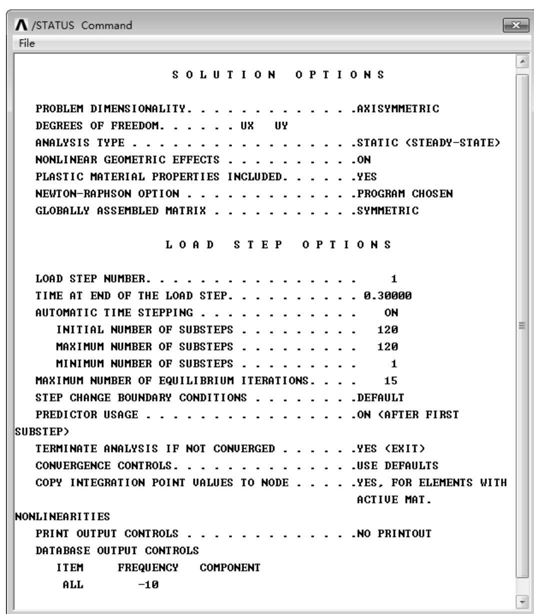


图 10-151 STATUS Command 窗口

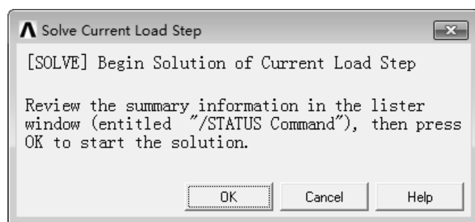


图 10-152 Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。求解过程中的收敛曲线如图 10-153 所示。

用户可以通过图 10-153 所示所收敛曲线观察到计算过程的收敛情况，对于结果的判断分析、出现不收敛时的处理有一定的参考意义。

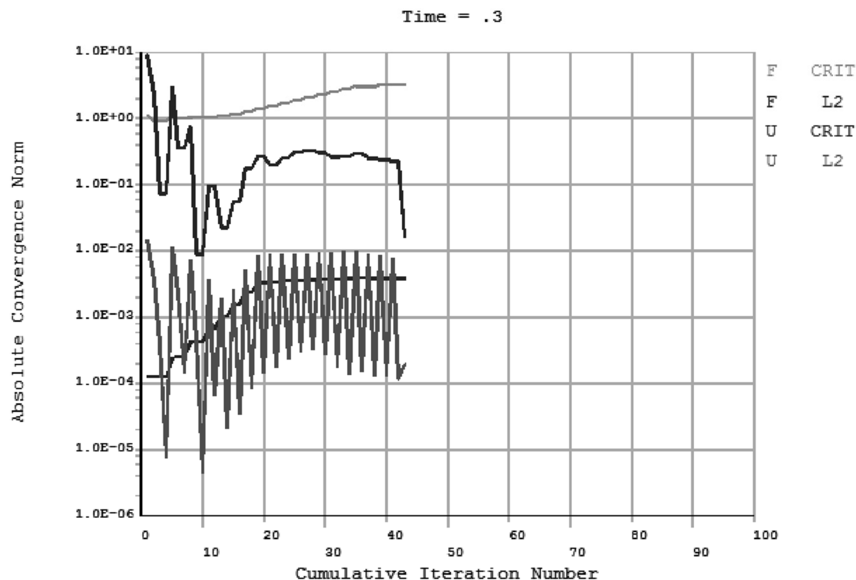


图 10-153 收敛曲线

完成求解后可以进行后处理。

14）在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results>Deformed Shape…命令，弹出图 10-154 所示的 Plot Deformed Shape 对话框。

在图 10-154 所示的 Plot Deformed Shape 对话框中选择 Def+undef edge 选项，单击 OK 按钮，即可在工作区中显示如图 10-155 所示的变形图。

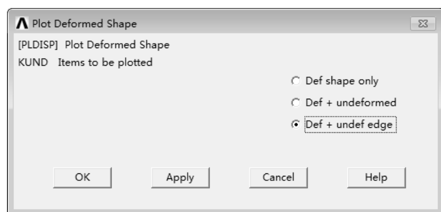


图 10-154 Plot Deformed Shape 对话框

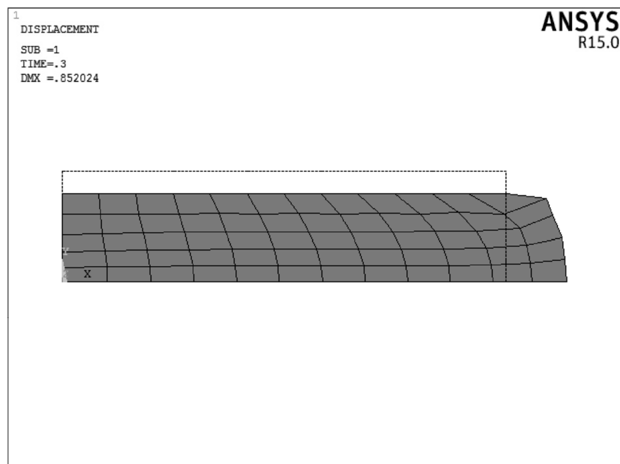
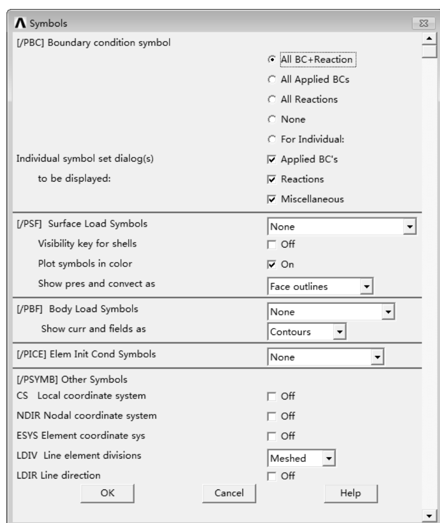


图 10-155 变形图

15）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls> Symbols 命令，弹出图 10-156 所示的 Symbols 对话框，选择 Boundary condition symbol> All BC+Reaction，单击 OK 按钮。

在图 10-157 中，可以看到模型的受力分布。



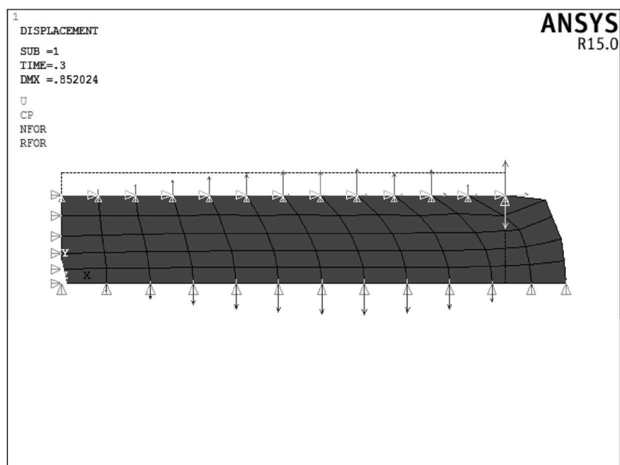
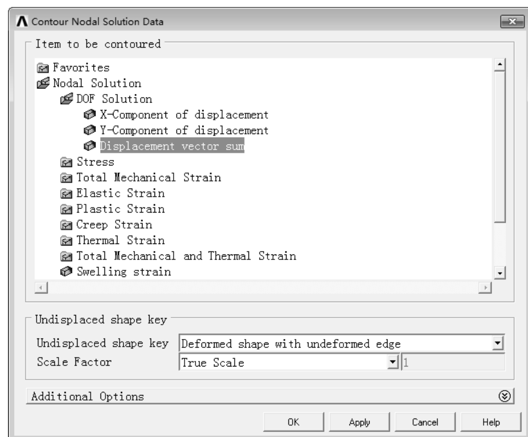


图 10-156 Symbols 对话框

图 10-157 显示反作用力

16）在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 命令，弹出图 10-158 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 10-159 所示。



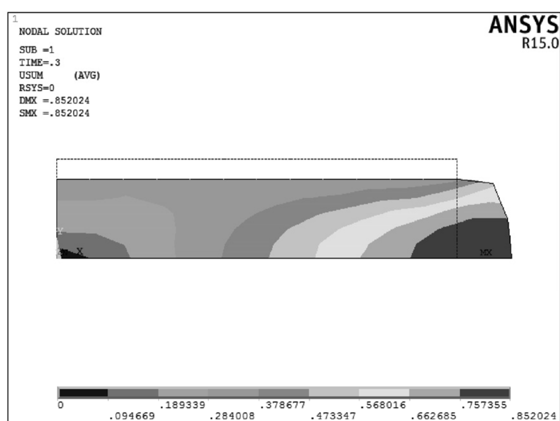


图 10-158 Contour Nodal Solution Data 对话框

图 10-159 位移云图

注意本例为大应变问题，在图 10-158 中选择的缩放比例为 1，在工作区中仍可以看到明显的变形。

17）采用与步骤 16）同样的方法显示项目的节点解如图 10-160～图 10-163 所示。

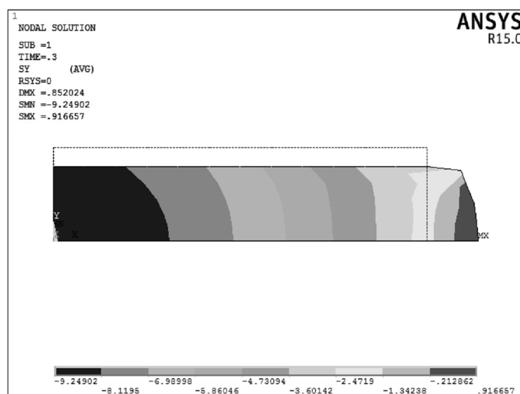


图 10-160　Y 方向应力云图

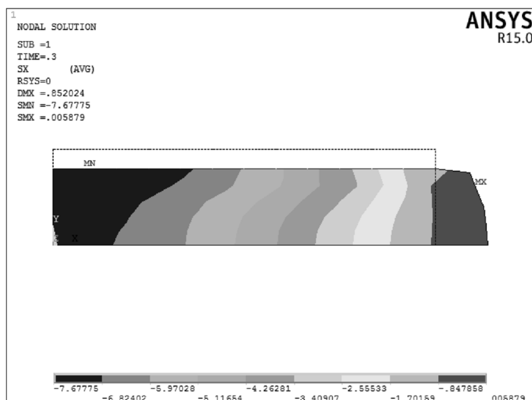


图 10-161　X 方向应力云图

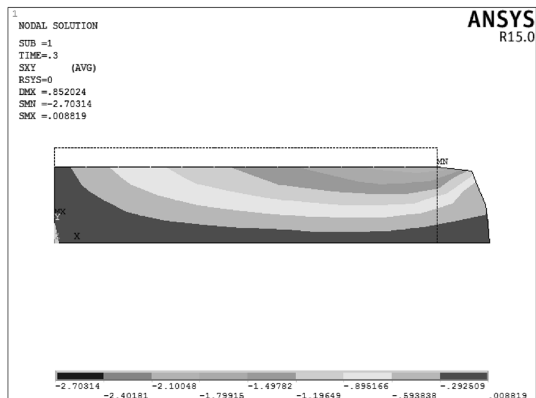


图 10-162　XY 剪应力云图

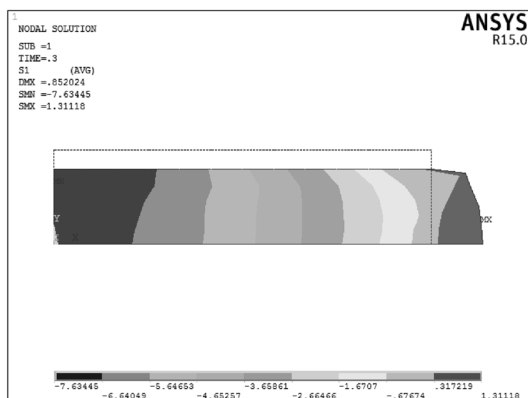


图 10-163　第一主应力云图

单击工具栏中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框。选择 Save Everything 选项，保存所有项目，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

10.5　本章小结

非线性分析是 ANSYS 分析的重要应用场合。与线性分析相比，非线性分析更加接近真实问题，但进行计算也更为复杂，难度更高。

进行非线性分析要求用户具有一定的工程力学知识，希望读者学好材料力学、弹性力学、弹塑性力学等基础力学科目，从而能对复杂的非线问题更好地把握，特别是在处理分析过程出现不收敛问题、结果不理想等情况时，需要读者具有一定的工程经验、分析经验与力学知识才能处理。

本书介绍的接材料非线性问题、几何非线性问题、接触问题等只是非线性问题的冰山一角，希望能抛砖引玉，读者以此为基础，学习更多的非线性分析知识，结合 ANSYS 强大的非线性分析功能，在实际工程中发挥作用。



第 11 章　锤击法施工仿真分析

ANSYS 除了提供标准的隐式动力学分析以外，还提供了显式动力学分析模块 ANSYS/LS-DYNA。用于模拟非常大的变形，惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。它的显式方程求解冲击、碰撞、快速成型等问题，是目前求解这类问题最有效的方法。

ANSYS/LS-DYNA 将显式有限元程序 LS-DYNA 和 ANSYS 程序强大的前后处理结合起来。用 LS-DYNA 的显式算法能快速求解瞬时大变形动力学、大变形和多重非线性准静态问题以及复杂的接触碰撞问题。使用本程序，可以用 ANSYS 建立模型，用 LS-DYNA 做显式求解，然后用标准的 ANSYS 后处理来查看结果。也可以在 ANSYS 和 ANSYS-LS-DYNA 之间传递几何信息和结果信息以执行连续的隐式-显式/显式-隐式分析，如坠落实验、回弹及其他需要此类分析的应用。

本章学习目标

- 掌握 ANSYS 显式动态分析的基本流程。
- 掌握 ANSYS 显式动态分析单元使用方法。
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的建模方法。
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的边界条件类型。
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的边界施加方法。
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的求解方法。
- 了解 ANSYS 显式动态分析的接触分析方法。
- 了解 ANSYS 显式动态分析的材料模型。
- 了解 ANSYS 显式动态分析中的刚体。
- 掌握 ANSYS 显式动态分析的后处理方法。
- 了解 ANSYS 显式动态分析跌落模块。

11.1　ANSYS 显式动态功能模块简介

显式动态分析能够模拟真实世界的各种复杂问题，特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸和金属成型等非线性动力冲击问题，同时可以求解传热、流体及流固耦合问题。进行显式动态分析与常规的隐式分析略有不同，本章将对其进行简要介绍。

11.1.1　显式动态分析的流程

显式动态分析求解过程与 ANSYS 程序中其他分析过程类似，主要由 3 个步骤组成：

1）建立模型（用 PREP7 前处理器）。

2）加载并求解（用 SOLUTION 处理器）。

3）查看结果（用 POST1 和 POST26 后处理器）。

在显式动态分析中，可以使用与其他 ANSYS 分析相同的命令来建立模型、执行求解。同样，也可以采用 ANSYS 图形用户界面（GUI）中类似的选项来建模和求解。

然而，在显式动态分析中有一些独特的命令，如表 11-1 所示。

表 11-1　LS-DYNA 命令

命　　令	功　　能
EDADAPT	激活自适应网格
EDASMP	创建部件集合
EDBOUND	定义一个滑移或循环对称界面
EDBVIS	指定体积粘性系数
EDBX	创建接触定义中使用的箱形体
EDCADAPT	指定自适应网格控制
EDCGEN	指定接触参数
EDCLIST	列出接触实体定义
EDCMORE	为给定的接触指定附加接触参数
EDCNSTR	定义各种约束
EDCONTACT	指定接触面控制
EDCPU	指定 CPU 时间限制
EDCRB	合并两个刚体
EDCSC	定义是否使用子循环
EDCTS	定义质量缩放因子
EDCURVE	定义数据曲线
EDDAMP	定义系统阻尼
EDDC	删除或杀死/重激活接触实体定义
EDDRELAX	进行有预载荷几何模型的初始化或显式分析的动力松弛
EDDUMP	指定重启动文件的输出频率（d3dump）
EDENERGY	定义能耗控制
EDFPLOT	指定载荷标记绘图
EDHGLS	定义沙漏系数
EDHIST	定义时间历程输出
EDHTIME	定义时间历程输出间隔
EDINT	定义输出积分点的数目
EDIS	定义完全重启动分析的应力初始化
EDIPART	定义刚体惯性
EDLCS	定义局部坐标系
EDLOAD	定义载荷
EDMP	定义材料特性
EDNB	定义无反射边界

（续）

命　　令	功　　能
EDNDTSD	清除噪声数据，提供数据的图形化表示
EDNROT	应用旋转坐标节点约束
EDOPT	定义输出类型为 ANSYS 或 LS-DYNA
EDOUT	定义 LS-DYNAASCII 输出文件
EDPART	创建、更新、列出部件
EDPC	选择、显示接触实体
EDPL	绘制时间载荷曲线
EDPVEL	在部件或部件集合上施加初始速度
EDRC	指定刚体/变形体转换开关控制
EDRD	刚体和变形体之间的相互转换
EDREAD	把 LS-DYNA 的 ASCII 输出文件读入到 POST26 的变量中
EDRI	为变形体转换成刚体时产生的刚体定义惯性特性
EDRST	定义输出 RST 文件的时间间隔
EDSHELL	定义壳单元的计算控制
EDSOLV	把“显式动态分析”作为下一个状态主题
EDSP	定义接触实体的小穿透检查
EDSTART	定义分析状态（新分析或是重启动分析）
EDTERM	定义中断标准
EDTP	按照时间步长大小绘制单元
EDVEL	给节点或节点组元施加初始速度
EDWELD	定义无质量焊点或一般焊点
EDWRITE	将显式动态输入写成 LS-DYNA 输入文件
PARTSEL	选择部件集合
RIMPORT	把一个显式分析得到的初始应力输入到 ANSYS
REXPORT	把一个隐式分析得到的位移输出到 ANSYS/LS-DYNA
UPGEOM	相加以前分析得到的位移，更新几何模型为变形构型

11.1.2 显式动态单元

LS-DYNA 单元就是用于进行显示动力学分析的单元。常用的有 LINK160（显式三维杆单元）、BEAM161（显式三维梁单元）、SHELL163（显式结构薄壳）、SOLID164（显式三维结构实体）、COMBI165（显式弹簧-阻尼单元）、MASS166（显式三维结构质量）、LINK167（显式承拉杆单元）等。

LINK160 在每个节点上有 3 个自由度传递轴向力。本单元只用于显式动力分析，如图 11-1 所示。

BEAM161（见图 11-2）有几个特征：采用客观增量应变（刚体旋转不生成应变），可模拟实际应用中存在的大变形，计算效率和鲁棒性都很好，与块单元兼容，包含有限横向剪切应变。然而，用来维持这个应变组元所需增加的计算时间较长。Belytschko 梁单元方程（KEYOPT（1）＝2，4，5）是结构有限元家族的一部分，它用一个“共同旋转技术”来处理

大旋转。本单元只用于显式动力分析。

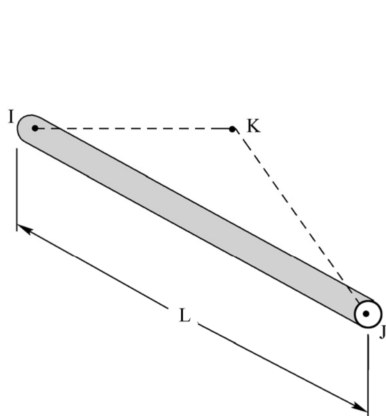


图 11-1　LINK160 单元

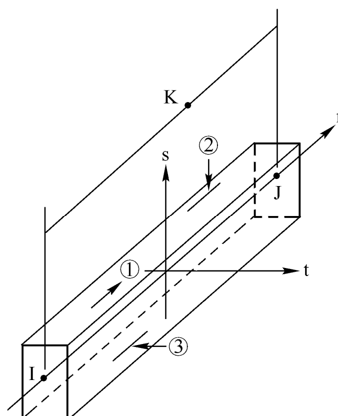


图 11-2　BEAM161 单元

SHELL163 是一个 4 节点单元，有弯曲和膜特征。可加平面和法向载荷，如图 11-3 所示。单元在每个节点上有 12 个自由度：在节点 X、Y 和 Z 方向的平动、加速度、速度和绕 X、Y 和 Z 轴的转动。本单元只用于显式动力分析。

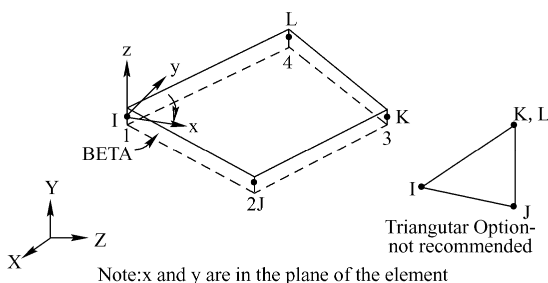


图 11-3　SHELL163 单元

SOLID164 用于三维实体结构建模，几何模型如图 11-4 所示。单元由 8 个节点定义，在每个节点上有下列自由度：在节点 X、Y 和 Z 方向的平动、速度、加速度。本单元只用于显式动力分析。

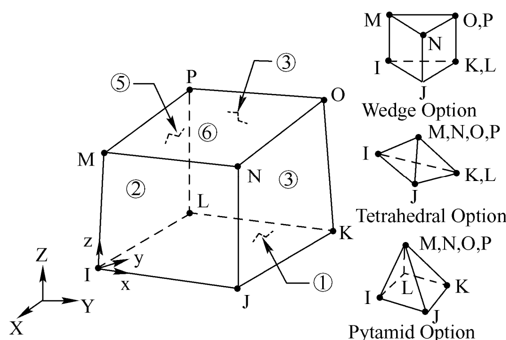


图 11-4　SOLID164 单元

PLANE162 单元是一个二维、4 节点的实体单元，它既可以用作平面（X-Y 平面）单元，也可以用作轴对称单元（Y 轴对称）。KEYOPT（3）用来指定单元的平面应力、轴对称和平面应变选项。对于轴对称单元可以利用 KEYOPT（2）指定面积或体积加权选项。PLANE162 典型情况下为 4 节点单元。当然也可以用 3 节点三角形选项，但是由于它太僵硬，所以不推荐使用它。这个单元没有实常数。重要的是要注意到含有 PLANE162 单元的模型必须仅包含这种单元。ANSYS/LS-DYNA 中不允许有二维和三维单元混合使用的有限元模型。

这种单元可用的材料模型与 KEYOPT（3）的设置有关。对 KEYOPT（3）=0，1，2（平面应力、平面应变或轴对称），用户可以选择下列材料模型。

- 各向同性弹性。
- 正交各向异性弹性。
- Blatz-ko 橡胶。
- Mooney-Rivlin 橡胶。
- 粘弹性。
- 双线性各向同性。
- 双线性随动强化。
- 塑性随动强化。
- 幂率塑性。
- 应变率相关幂率塑性。
- 应变率相关塑性。
- 分段线性塑性。
- 复合材料破坏。
- Johnson-Cook 塑性。
- Bamman。

对平面应力选项（KEYOPT（3）=0），可以选择下列材料。

- 3 参数 Barlat 塑性。
- Barlat 各向异性塑性。
- 横向正交各向异性弹塑性。
- 横向正交异性 FLD。

对轴对称和平面应变选项（KEYOPT（3）=1 或 2），可以选用下列材料。

- 正交各向异性弹性。
- 弹塑性流体动力。
- 闭合多孔泡沫。
- 低密度泡沫。
- 可压缩泡沫。
- Honeycomb 蜂窝材料。
- 空材料。
- Zerilli-Armstrong。
- Steinberg。

● 弹性流体。

LINK167 单元是仅能拉伸的杆，可以用于模拟索。它与弹性单元类似，由用户直接输入力与变形的关系。本单元类型需要用 EDMP 命令来定义索单元选项。

COMBI165 是显式弹簧-阻尼单元。弹簧单元因位移产生一个力；也就是说改变单元的长度产生力。力沿单元轴向加载。例如，拉力在节点 1 上是沿轴的正方向，而对节点 2 是沿轴的负方向。默认时，单元轴的方向就是从节点 1 到节点 2。当单元旋转时，力作用方向线也将随之而旋转。阻尼单元可认为是弹簧单元的一种：可模拟线性粘性和非线性粘性阻尼。也可使用旋转（扭转）弹簧和阻尼单元，这些可通过 KEYOPT（1）来选择，其他输入部分和平移弹簧一样；给定的力-位移关系可认为是力矩-转角（为弧度单位）关系，力矩施加方向沿单元的轴向方向（顺时针为正）。旋转弹簧单元只影响其节点的旋转自由度——它们并不把节点铰接在一起。

COMBI165 单元可和其他显式单元混合使用。然而，由于它没有质量，在分析中不能只有 COMBI165 一种类型单元，为了表达一个弹簧/质量系统，必须定义 MASS166 单元来加上质量。对于同一个 COMBI165 单元不能同时定义弹簧和阻尼特性。但是，可以分别定义使用同样节点的弹簧和阻尼单元（也就是说，可以重叠两个 COMBI165 单元）。对于 COMBI165 单元可以使用下列材料模型。

● 线弹性弹簧。
● 线粘性阻尼。
● 弹性塑料弹簧。
● 非线性弹性弹簧。
● 非线性粘性阻尼。
● 通用非线性弹簧。
● 麦克斯韦粘弹性弹簧。
● 无弹性拉伸或仅压缩弹簧。

使用 COMBI165 单元时，应该给每一零件分别指定唯一的实常数、单元类型和材料特性（分别是 R，ET 和 TB 命令）从而保证每个零件都分别定义。

MASS166 质量单元由一个单节点和一个质量值定义。质量单元通常用于模拟一个结构的实际质量特性，而没有把大量实体单元和壳体单元包括进去。例如，在汽车碰撞分析中，质量单元可以模拟发动机部分，采用质量单元将减少分析所需的单元数目，因而减少求解所需的计算时间。

用户也可用 MASS166 单元来定义一个节点的集中转动惯量。如使用这一选项，可在 MASS166 单元定义中设置 KEYOPT（1）=1 并且通过单元实常数输入 6 个惯性矩值（IXX，IXY，IXZ，IYY，IYZ，IZZ）。这个选项不能输入质量值；所以，必须在同一个节点定义第二个质量单元来说明质量（KEYOPT（1）=0）。

以下几种单元可被定义为刚性体：LINK160，BEAM161，PLANE162，SHELL163，SOLID164 和 LINK167。每个实体单元、壳单元和梁单元的质量都平均分配给单元的节点。在壳单元和梁单元中，每个节点还将附加一个转动惯量；只采用一个单值，它的作用就是让质量围绕节点呈球形分布。



11.1.3 显式动态分析建模

显式动态分析的第一步就是创建模型，使它能够表达进行分析的物理系统。用 PREP7 前处理器来建立模型。

如果通过 GUI 路径进行分析的话，那么事先设置参考选项（Main Menu>Preference）为 LS-DYNA Explicit 是很重要的。这样，菜单就被完全过滤成为显式动态的输入选项。值得注意的是，Preference 选项设置为 LS-DYNAExplicit 并没有激活 LS-DYNA 求解。要做到这一点，就必须定义一个显式单元类型，例如，SHELL163。

一旦设置好分析选项 Preference，就可以像通常分析任何问题一样建立模型：

- 定义单元类型和实常数。
- 定义材料模型。
- 定义几何模型。
- 划分网格。
- 定义接触表面。

一旦选择好能代表物理系统的单元类型，就可以用 ET 命令来定义单元类型（GUI：Main Menu>Preprocessor>Element Type），用 R 命令来定义实常数（GUI：Main Menu>Preprocessor> Real constants）。

在显式动态分析中有很多可使用的材料类型，应该参看一下《ANSYS Element Reference》帮助文档，以确定特定的单元类型所用的材料模型。一旦确定了所用的材料模型，就可以定义所有相关的特性。为了用批处理或命令流来定义这些，可以使用 MP，TB 和 TBDATA 命令（某些情况下，可用 EDMP 命令）。在 GUI 界面中，材料模型通过下列路径来定义：

- Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models。

在选择了合适的材料模型之后，就可以定义模型所需的特性。

定义和整体坐标不一致的各向正交异性模型，必须先用 EDLCS 命令定义局部坐标系（GUI：Main Menu>Preprocessor>Material Props>Local CS>Create Local CS）。

对于一些材料模型，还需用 EDCURVE 命令定义与材料相关的数据曲线（如，应力-应变曲线）。EDCURVE 的 GUI 界面操作为 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Curve Options。

建立几何模型的最简单方法就是采用 ANSYS 程序中的实体建模功能。对于简单模型（如仅线单元），就可以使用直接建模法。用这种方法，可以直接定义模型的节点和单元。详细信息请参看第 2 章。

建立实体模型后，就可以用节点和单元对其进行网格划分。第 3 章详细描述了划分网格的步骤。如果对 ANSYS 网格不太熟悉，在划分显式动态模型之前应该先阅读该章内容，由于该章已详细讨论过了，在此只讨论以下几点：

1）定义单元属性。

2）定义网格划分控制。

3）生成网格。

定义单元属性，就是要事先指定单元类型，实常数和材料特性来用于下一步的网格划

分。使用 TYPE，MAT，REAL 命令或菜单路径：

- Main Menu>Preprocessor>-Attributes-Define>Default Attribs。
- Main Menu>Preprocessor>-Modeling-create>Elements>Elem Attributes。

网格控制就是指定划分网格时单元的大小和形状。在 ANSYS 程序中有许多种控制方法，在 GUI 中，菜单路径为 Main Menu>Preprocessor>Mesh Tool。

在选择网格控制时要注意以下几点：

- 尽量避免退化的实体和壳体单元（如三角型壳体和四面体实体），相对于四边形和六面体来说它们太刚硬，并且精度不高。
- 单元的大小尽量均匀（如避免产生相对较小的单元面积），单元大小之间差别很大可能会导致很小的时间步长，较长的运行时间。如果划分特殊的几何模型需要相对较小的单元，那么可以用质量比例来增大最小时间步长。
- 尽量不要使用 Smart Sizing 方法进行单元控制（SMARTSIZE 命令），因为它可能在网格中单元的大小上产生很大的差别。应使用 ESIZE 和相关的命令来控制单元大小。
- 尽量避免可能产生沙漏的坏单元形状。
- 当使用降阶单元算法或者单元可能遭受沙漏变形时，不要使用粗网格划分。
- 如果有沙漏现象的话，尽量在部分模型或整个模型中使用全积分单元。

给定网格控制后，就可以用相应的命令进行网格划分（如 AMESH、VMESH）。在 GUI 界面中，菜单路径为 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh（或用上面提到的 Mesh Tool）。

显式动态分析常常涉及到表面之间的接触。定义接触包括 4 个步骤：

1）定义能很好地表达物理模型的接触类型（EDCGEN 命令）。

2）定义接触表面（CM，EDPART，EDASMP 和 EDCGEN 命令）。

3）定义摩擦系数参数（EDCGEN）。

4）为选定的接触类型定义附加数据（EDCGEN 和 EDCONTACT）。

如果不使用自动接触，那么可以用 CM 命令把表面上的节点组成为一个 COMPONENT 来定义接触面。一旦生成了 COMPONENT，就可以用 EDCGEN 命令来定义所需表面间的接触（如节点部件）。也可以用 EDCGEN 命令来定义接触类型。对于单面接触算法，ANSYS/LS-DYNA 定义接触体的外表面。

注意，接触表面也可以用 PART 号或一个部件集合来识别（用 EDASMP 而不用节点部件）。

EDCGEN 命令也可以用来指定摩擦系数参数以及与不同接触类型相对应的输入参数。另一个命令 EDCONTACT 可以定义多种接触控制，例如接触穿透检测和滑移表面罚函数等（GUI：Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Contact.）。

当创建显式动态模型时，应考虑下述基本准则。

- 在模型中使用刚性体来代表相对刚硬，没有屈服的部分。使用刚性体可以简化求解，缩短求解时间。
- 对材料性能使用一些符合实际的值。例如，不要用很高的不切实际的弹性模量来表达刚性体，对于壳单元不要使用不切实际的厚度值。
- 考虑使用阻尼（EDDAMP 命令），以消除结构响应中不真实的振荡。

- 如果已经用常规 ANSYS 程序进行了二维的动态分析，应考虑把模型扩展为三维模型，并用 ANSYS/LS-DYNA 进行分析。那么就可以在较短的时间内得到更精确的结果。

注意，ANSYS 程序中的子模型和超单元特性不能在 ANSYS/LS-DYNA 中使用。

具有相同单元类型、实常数和材料号的一组单元被指定为一个 PART，并给定一个 PART 号。有许多 ANSYS/LS-DYNA 命令和 PART ID 有关（例如，EDCGEN，EDDC，EDLOAD，EDDAMP，EDCRB 和 EDREAD）。在 ANSYS/LS-DYAN 程序对模型进行求解时，自动生成 PART 号并且写入 LS-DYNA 输入文件 Jobname.K，它可以用 EDPART 命令建立、更新、列表表示。

从顺序编排所选单元建立 PART 号。如果在单元编排中改变单元类型、实常数和材料号中的任何一个，将给那组单元定义下一个 PART 号。例如，前 10 个单元有单元类型 1、实常数 2、材料号 3，那么这 10 个单元将给定 PART 号为 1。如果下面 100 个单元有单元类型 1、实常数 1、材料号 2，那么这些单元将给定 PART 号为 2 等，依此类推。

用 EDPART 命令中的 CREATE/UPDATE/LIST 选项可以创建、更新、列出 PART 表。如果执行 SOLVE 命令或执行带 ANSYS/LSDYNA/BOTH 选项的 EDWRITE 命令，则 PART 表将被建立并永久保存。如果 PART 表已经存在，则以后的命令只能修改这个表而不能覆盖它。

EDPART，CREATE 可以创建新的 PART 号。可以用 EDPART，LIST 命令列表表示这些 PART。这个表显示了在建立或修改 PART 时的状态。（EDPART，CREATE）如果 EDPART，CREATE 命令重复使用，则 PART 表被覆盖。为了得到在修改或增加模型后的实际 PART 表，执行 EDPART，UPDATE 命令。它可以扩展已经存在的 PART 表而不用改变它的顺序，并且可以向已经存在的由相同的单元类型、实常数和材料号构成的部件中增加单元。单元类型、实常数和材料号相同的任何 PART 未被任何所选择单元参考时，则该 PART 不可用。很明显的它将在 PART 表的第五列上为零值。如果预先定义的 PART 相关命令与一个无用的 PART 有关，那么执行 SOLVE 命令或 EDWRITE，ANSYS /LSDYNA /BOTH 命令时将有一个警告。

在金属成形和高速撞击分析中，物体要经历很大的塑性变形。单积分点显式单元，常用于大变形，但是在这种情况下，由于单元纵横比不合适可能给出不精确的结果。为了解决这一问题，ANSYS/LS-DYNA 程序可以在分析过程中自动重新划分表面来改善求解精度。这一功能，即自适应网格划分，由 EDADAPT 和 EDCADAPT 命令控制。

EDADAPT 命令在一个指定的 PART 内激活自适应网格划分。（用 EDPART 命令创建或显示有效 PARTIDs），例如，为了给 PART1 打开自适应网格划分，可以执行下列命令：

```
EDADAPT，1，ON
```

注意，自适应网格划分功能仅对包含 SHELL163 单元的部件有效。

当此项功能打开时，分析中该部件的网格将自动重新生成。从而保证在整个变形过程中有合适的单元纵横比。自适应网格划分一般应用在大变形分析例如金属变形中（调节网格最典型的应用是板料）。在一个模型中要在多个部件上应用此功能，必须对每个不同的 PARTID 执行 EDADAPT 命令。默认时，该功能是关闭的。

在指定需要重新划分的部件后，必须用 EDCADAPT 命令定义网格划分参数。采用

EDADAPT 命令定义需要网格划分的所有 PARTID 号，用 EDCADAPT 命令对其设置控制选项。

EDCADAPT 命令控制的参数如下所示。

- Frequency（FREQ）：调节自适应网格划分的时间间隔。例如，假设 FREQ 为 0.01，如果单元变形超过指定的角度容差，则其将每隔 0.01s 被重新划分一次（假设时间单位为 s）。因为 FREQ 的默认值为 0.0，所以在分析中应用自适应网格划分时必须指定此项。
- Angle Tolerance（TOL）：对于自适应网格划分（默认值为 1e31）有一个自适应角度公差。TOL 域控制着单元间的纵横比，它对保证结果的精度是非常重要的，如果单元之间的相对角度超过了指定的 TOL 值，单元将会被重新划分。
- AdaptivityOption（OPT）：对于自适应网格划分有两个不同的选项。对于 OPT=1，和指定的 TOL 值相比较的角度变化只是根据初始网格形状计算的；对于 OPT=2，和指定的 TOL 值相比较的角度变化是根据前一次重新划分的网格计算的。
- MeshRefinementLevels（MAXLVL）：MAXLVL 域控制着整个分析中单元重新划分的次数。对于一个初始单元，MAXLVL=1 可以创建一个附加单元，MAXLVL=2 允许增加到 4 个单元，MAXLVL=3 允许增加到 16 个单元。高 MAXLVL 会得到更精确的结果，但也会明显增加模型规模。
- Remeshing Birth and Death Times（BTIME and DTIME）：自适应网格划分的生死时间控制着该功能在分析过程中的激活或关闭。例如，如果设置 BTIME=.01 和 DTIME=.1，那么分析中只在 0.01 和 0.1s 间进行重新网格划分（假设时间单位为 s）。
- Interval of Remeshing Curve（LCID）：数据曲线把重新划分网格的时间间隔定义为时间的函数。数据曲线的横坐标为时间，而纵坐标为变化的时间间隔。如果这个选项不为 0，那么它将代替适应频率（FREQ）。但是要注意，开始第一个自适应性循环仍需要非零 FREQ 值。
- Minimum Element Size（ADPSIZE）：根据单元边长设定的最小单元尺寸。如果不定义此参数，边长的限制将被忽略。
- One or Two Pass Option（ADPASS）：如果 ADPASS=0，将使用双通道自适应划分，在重新划分网格后将重复这一计算（默认值）。如果 ADPASS=1，则使用单通道自适应划分，而计算不再重复。
- Uniform Refinement Level Flag（IREFLG）：值为 1、2、3 等，分别允许 4、16、64 等划分等级。对于每个初始单元都分别生成统一的单元。
- Penetration FLAG（ADPENE）：根据 ADPENE 是正（到达）的还是负（穿透）的，当接触表面到达或穿透工具表面时，程序将依据这个值调整网格。自适应细化主要依据加工曲线。如果 ADPENE 是正的，细化一般发生在接触之前；因此，可能用单通道划分就可以了（ADPASS=1）。
- Shell Thickness Level（ADPTH）：绝对薄壳厚度标准，低于该值自适应划分开始。这个选项仅在自适应角度公差不为零的情况下有用。如果期望不改变角度，激活基于厚度的自适应重新划分功能，那么可把 TOL 设为较大的角度（如果 ADPTH=0.0，不使用这个选项）。
- Maximum Element Limit（MAXEL）：自适应结束的最大单元数。如果超过了此值，

自适应将被中止。

对于大多数问题，不应该用自适应网格划分进行初始分析。如果分析结果出现扭曲的网格，或结果不正确，那么再应用此项重新进行分析。当LS-DYNA分析中因为negative volume element的错误终止时，也可用此项分析。

当打开自适应网格划分选项时，在求解过程中模型内的单元数将发生变化。在一个调节循环结束后，网格将被更新，并且生成一个扩展名为 RSnn 的新结果文件，这里 nn 为自适应网格标准（在由 FREQ 指定的每个时间增量或 LCID 指定的时间间隔，都会发生自适应循环）。例如，重新划分两次网格的模型将产生两个结果文件，Johname.RS01 和 Johname.RS02。

注意，即使每次循环网格不发生变化，也会产生一个新的结果文件。

每次循环都会产生一个扩展名为 HInn 的时间历程文件，尽管这些文件可能不如 RSnn 文件有用。此外，LS-DYNA 还创建了一系列源文件名为 adapt 的文件。因此，在激活调节网格划分时，不要把 adapt 作为工作名。

11.1.4 显式动态分析的边界条件

当模型建好后，下一步就是给结构加载为求解作准备，为了能正确地模拟结构的响应，就必须定义与指定时间间隔相对应的载荷。

与许多隐式分析不同的是，显示分析中的所有载荷必须与时间有关。因此，在 ANSYS/LS-DYNA 中，许多标准的 ANSYS 命令都是无效的。在 ANSYS/LS-DYNA 中，尤其不能使用 F，SF，BF 系列命令，因为它们只能定义与时间无关的载荷。此外，D 命令只能定义节点约束。基于上述原因，在 ANSYS/LS-DYNA 中用一对数组参数定义载荷（一个用来定义时间，另一个定义载荷）。

注意，虽然节点加速度（Ax，Ay，Az）和节点速度（Vx，Vy，Vz）以自由度出现，但它们不是物理自由度，不能使用D命令约束。要采用EDLOAD命令给这些节点施加载荷。

在 ANSYS/LS-DYNA 中，所有载荷都是在一个载荷步内施加的。这和隐式分析有很大的不同，它在多个载荷步内施加载荷。在 ANSYS/LS-DYNA 中，对于一些特定的载荷，也可以用EDLOAD命令指定何时施加（birth time）、何时去除（death time）。请参考EDLOAD命令中的Birth Time，Death Time和CID，检验birth/deathtime的适用性。

给模型施加载荷，需遵循以下步骤：

1）把模型中受载的那部分定义成Component（或PART，用于刚体）。

2）定义包含时间间隔和载荷数值的数组参数。

3）定义载荷曲线。

4）如果不是在整体坐标系中加载，需要用EDLCS命令定义载荷方向。

5）模型加载。

除给刚性体加载外，显式分析中所有载荷都施加到Component上。因此，第一步就是把模型中受载的那部分组合成Component，每个Component应由模型中承受同样载荷的部分组成。并且可以通过材料本构、模型中位置、预期状态等联系在一起。

例如，想要分析一个棒球撞击到墙上的结果，可以定义球上的节点为一个 Component，球棒上的节点为另一个Component，墙上的节点为第三个Component。

可以定义任意多个 Component，然后给每一个 Component 加载，Component 必须由节点或单元组成（只有当施加压力载荷时 Component 才由单元组成）定义 Component 时，首先要选择 Component 中想要包含的部分，然后使用 GUI 中的下列菜单路径来定义 Component（CM）：Utility Menu> Select> Comp /Assembly> Create Component。

对于刚性体，载荷一般都施加到 PART 号上，而不是 Component 上。这是因为当使用命令 EDMP，RIGID，MAT 定义刚性体时已经包含有一系列节点和单元。

值得注意的是，显式动态分析中，载荷在一些特定时间间隔内施加到结构上，这样就可以观察在特定时间段里施加载荷后模型的瞬态行为。因此，不仅需要定义施加载荷的类型（FX，FY，FZ，ROTX，ROTY，ROTZ 等），同时也需要定义载荷施加到结构上的时间间隔值。

时间间隔值和其相对应的载荷值组合在一起定义为数组参数。这些参数必须定义为两部分，第一部分为时间间隔值，第二部分为载荷值，载荷应与时间间隔相对应。在 GUI 中，采用菜单路径来定义一个数组参数：Utility Menu>Parameters>Array Parameters>Define/Edit.

注意，可以通过线性插值得到中间时间点的载荷值。指定时间范围外的载荷值不能由程序插入。因此，必须保证载荷时间范围至少等于求解时间。否则，由于过早的去除载荷求解结束时的结果将会变为无效值。

一旦定义了能代表载荷的数组参数，这些载荷与时间有关，就可以直接用 EDLOAD 命令输入参数定义载荷。或者，可以用 EDCURVE 命令输入参数来定义载荷曲线。相对应的载荷曲线 ID 可用 EDLOAD 命令输入。

一旦定义好 Component 和数组参数，就可以给建立的模型加载（EDLOAD 命令）。在 GUI 中，可以选择下列菜单路径：Main Menu>Solution>Loading Options>Specify Loads。

可以选择增加载荷（EDLOAD 中 ADD 标号），如力、力矩、节点加速度、表面压力等，所有的载荷都用 EDLOAD 命令施加到整体笛卡儿坐标系上，此为其默认值。

GUI 的对话框将列出所有有效载荷，以及先定义好的 Component 和数组参数。只需简单地选择所需的载荷标号，以及 Component（刚体的 PART 号）和数组参数集合（预先定义的载荷曲线号）。值得注意的是，并不是所有的载荷标记都适用于所有 Component 或 PART 号。

以下的载荷标记只适用于节点 Component。

- 力：FX，FY，FZ。
- 力矩：MX，MY，MZ。
- 位移：UX，UY，UZ。
- 转角：ROTX，ROTY，ROTZ。
- 速度：VX，VY，VZ。
- 节点加速度：AX，AY，AZ。
- 体加速度：ACLX，ACLY，ACLZ。
- 角速度：OMGX，OMGY，OMGZ。
- 温度：TEMP。

虽然 V（X，Y，Z）和 A（X，Y，Z）作为 DOFs 出现，它们实际上不是物理 DOFs。然而，这些量是被计算作为 DOF 求解和存储以用于后处理。

以下的标记只适用于刚性体（部件号）。

- 力：RBFX，RBFY，RBFZ。
- 力矩：RBMX，RBMY，RBMZ。
- 位移：RBUX，RBUY，RBUZ。
- 转角：RBRX，RBRY，RBRZ。
- 速度：RBVX，RBVY，RBVZ。
- 角速度：RBOX，RBOY，RBOZ。



以下标记只适用于单元 Component：

- 压力：PRESS。

除了施加载荷外，也可以用 EDLOAD，LIST 和 EDLOAD，DELE 来显示和删除载荷。用 EDFPLOT 命令也可以显示单元上的载荷标号，并且可以用 EDPL 命令绘制载荷曲线。

用 EDCURVE 命令定义的数据曲线广泛应用于 ANSYS/LS-DYNA 中。它们可以用来定义与显式动态材料模型有关的材料数据曲线（如应力-应变）和载荷数据曲线（力-偏转）。它还可以定义时间载荷曲线（力，位移，速度等）。这些载荷曲线可以用 EDLOAD 命令输入。

某些材料模型（如 TB，PLAW 或 TB，HONEY）要求指定材料特性数据，它们可能是有效应变速率、塑性应变或体积应变的函数。对于这些数据，在用 TBDATA 命令定义材料特性之前，需用 EDCURVE 命令定义特性曲线。在刚性体和压延筋接触问题中，也采用数据曲线来定义变形特性。

与对 Component 加载类似，数据曲线组合成数组参数，然后与特定的曲线参考号相联系，这个参考号可用于指定的材料模型（PLAW，HONEY 等）或接触类型（RNTR，ROTR）和压延筋。定义数据曲线可以分为以下几个步骤：

1）定义一个包含材料或摩擦力特性横坐标的数组参数（如，有效塑性应变、有效应变率、位移等）。

2）定义第二个数组参数，包含材料特性或摩擦力的纵坐标值（如，初始屈服应力、弹性模量、力等）。

3）定义数据曲线（EDCURVE）。选择一个数据曲线 ID 号，产生 TBDATA 时将采用这个数据曲线 ID 号来将这些数据与特定的材料特性相联系。

定义这些参数后，在 GUI 中采用下列路径定义数据曲线。

- MainMenu>Preprocessor>MaterialProps>CurveOptions。
- MainMenu>Solution>LoadingProps>CurveOptions。

可以用 EDCURVE，LIST 显示数据曲线，用 EDCURVE，PLOT 绘制曲线，用 EDCURVE，DELETE 删除曲线。

在开始求解之前，需要给模型施加约束。另外，还可能给运动物体设定初始速度。

与 ANSYS（隐式）不同，ANSYS/LS-DYNA 区分零约束与非零约束。非零约束如载荷处理（伴随着载荷曲线，见本章前面的讨论）。仅零约束才能使用 D 命令，也就是说，给定的值必须总是零。其他值无效，D 命令仅用于固定模型的某些部分。可以用零约束来实现对称/反对称边界条件。

用户可以用 EDNROT 命令在旋转节点坐标系中施加零载荷。但首先需用 EDLCS 命令定义局部坐标系。

当模拟几何体的小对称部分时，需定义滑移或循环对称。可以使用 EDBOUND 命令来定义滑移或循环对称的对称边界面。可以用节点组元确定边界或方向矢量来定义法向（滑移对称）或旋转轴（循环对称）。

在 ANSYS/LS-DYNA 中，可以用 EDCNSTR 命令模拟其他类型的约束。可用的约束类型有附加节点设置（ENS），节点刚性体（NRB），薄壳边界到实体（STS），以及铆接（RIVET）。在 GUI 中，可以通过路径 MainMenu>Solution>Constraints>Apply>AdditionalNodal 施加这些约束。

附加节点设置约束类型（EDCNSTR，ADD，ENS）允许在一个已经存在的刚性体上增加节点（通过节点组元），这个刚性体是用 EDMP 命令定义的，该节点组元不能和其他任何刚体连接在一起。在刚体上附加的节点可以放置在模型的任何地方，并且可放置在初始刚体外。ENS 选项有许多应用，包括在两个刚体结合的地方设置节点，定义施加节点载荷的节点，还可在指定的位置定义集中质量。

不像用 EDMP 命令定义的典型刚体一样，用 EDCNSTR，ADD，NRB 命令定义的节点刚体不是和一个部件号相联系，而是与一个节点组元有关。当模拟刚性连接（焊接）时，NRB 选项是非常有用的。对于一个刚性连接，不同柔性组元（有不同的 MATIDs）的部分作用在一起形成一个刚体。所以说很难用一个单一的 MATID（和相应的部件号）来定义这种类型的刚体。但是，用一个节点刚体很容易定义刚性连接。因为节点刚体不是和一个部件号相联系，所以使用刚体（如用 EDLOAD 命令施加的载荷）的其他选项不能用于节点刚体。

薄壳到实体边界选项（EDCNSTR，ADD，STS）把实体单元区域和薄壳单元区域固连起来，如图 10-5 所示，可将一个单独壳节点固连到最多 9 个实体节点上，这些实体节点定义一个 fiber 矢量。定义 fiber 矢量的实体单元节点在整个分析中保持线性但是在 fiber 方向上保持相对移动。薄壳节点必须和某个沿 fiber 方向的实体单元节点位置重合。

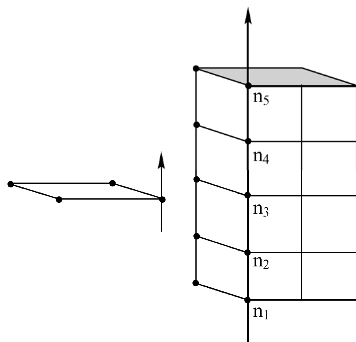


图 10-5　约束

与用 EDWELD 命令定义的焊接点相似，RIVET（EDCNSTR，ADD，RIVET）选项在两个不同位置的节点间定义了一个无质量刚性约束。和焊接点不同的是，一个 rivet 不能定义破坏。当定义了一个 rivet 时，节点间的距离将在模拟中的任何运动中保持不变。由 rivet 连接的节点不能是模型中其他约束的一部分。

在显动态分析中，模拟被焊接在一起的组元是很普遍的。在部件通常通过焊接装配在一起的汽车应用中，显得尤其普遍。这种情况下，在 ANSYS/LS-DYNA 中使用 EDWELD 命令来模拟焊接约束。可以模拟两种不同类型的焊接：无质量焊接点和一般焊接。用 EDWELD 命令连接的节点不能用其他方式约束。

对于一个无质量焊接，必须指定两个不同位置的节点。也可以用 EDWELD 命令输入失效参数在焊点内定义失效。失效依据下列关系：

$$\left(\frac{|f_x|}{S_x}\right)^{\exp x}+\left(\frac{|f_s|}{S_s}\right)^{\exp x}\geqslant 1$$

在 GUI 中，用下列菜单路径来定义一个无质量焊点：

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Spot weld>Massless Spotwld。

一般焊接用于模拟两个部件的长焊接截面。对于一般焊接，必须指定一个有效的节点组元，可以使用重合节点。但是，如果使用了重合节点，就必须定义输出数据所用的局部坐标系。一般焊接内的失效也可以用 EDWELD 命令的失效参数来定义，使用与上述等式相同的关系式。

在 GUI 中，采用下列菜单路径来定义一般焊接：

Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Spot weld>GenrlizdSpotwld。

在瞬动态模拟中，经常需要定义初始条件。在 ANSYS/LS-DYNA 中，可以用 EDVEL 和 EDPVEL 命令定义初始速度。可以使用这些命令对各种实体施加线速度和角速度。用 EDVEL 对节点组元或单个节点施加速度；用 EDPVEL 给部件或部件集合施加速度。

EDVEL 和 EDPVEL 提供了两种定义角速度的方法，Option=VGEN 和 Option= VELO. VGEN 方法围绕指定轴对一个实体（节点组元、部件等）施加刚体旋转。VELO 法直接给每个节点的自由度施加角速度。因为只有壳和梁单元有旋转自由度，VELO 法的角度输入只适用于 SHELL163 和 BEAM161 单元。对于 VGEN 和 VELO 方法，瞬态速度可以相对于整体笛卡儿坐标系来定义。

注意：为了模拟旋转体，不管是否用位移，都应该用 Option=VGEN 因为此方法施加了刚体旋转。

由于 LS-DYNA 的结构体系，定义初速度的两种方法 Option=VGEN 和 Option=VELO 不能在同一个分析中使用。

定义初速度，可使用下列步骤：

1）定义想要施加初速度的实体。这可以是单个节点，一个节点组元[CM]，一个部件[EDPART]或一个部件集合[EDASMP]。

2）确定 VGEN 和 VELO 是否适合的应用。

3）在 GUI 中采用下列菜单路径之一定义初始速度[EDVEL，EDPVEL]：

- Main Menu>Solution>Initial Velocity>-On Nodes-w/Nodal Rotate（VELO 选项）。
- Main Menu>Solution>Initial Velocity>-On Nodes-w/Axial Rotate（VGEN 选项）。
- Main Menu>Solution>Initial Velocity>-OnParts-w/Nodal Rotate（VELO 选项）。
- Main Menu>Solution>Initial Velocity>-OnParts-w/Axial Rotate（VGEN 选项）。

对于 VGEN 和 VELO 选项，相对于整体坐标系输入平动速度（EDVEL 或 EDPVEL 命令的 VX，VY 和 VZ 域）。对于 VELO 选项，在整体笛卡儿坐标系中输入节点角速度（OMEGAX，OMEGAY 和 OMEGAZ 域）；对于 VGEN 选项，输入角速度的数量级（OMEGAX）、旋转坐标轴（XC，YC，和 ZC 域）以及相对于整体 X，Y，Z 轴的方向角。

如果没有用 EDVEL 或 EDPVEL 命令指定初始速度，则所有的初始速度为零。同样的，如果仅指定 EDVEL（如 EDVEL，VGEN，Cname）命令的 Cname 域或 EDPVEL（EDPVEL，VGEN，PID）的 PID 域，由于这两个命令的其他域默认值为零，所以此时施加的初始速度为零。

若想改变事先用 EDVEL 命令指定的初始速度，用相同的组元名字或节点号重新定义一

个新的速度就可以了。这个新值将覆盖原来的组元或节点值。为了显示或删除事先加在节点或节点组元的初始速度，使用 EDVEL，LIST 和 EDVEL，DELE 命令（在 GUI 中，路径为 Main Menu>Solution>Initial Velocity>-On Nodes-List 或 Main Menu>Solution>Initial Velocity>-On Nodes-Delete）。

类似地，若想改变事先用 EDPVEL 命令指定的初始速度，可以用相同的部件或部件集合 ID 来重新定义一个新速度。这个新值将覆盖原来的部件或部件集合的速度。为了显示或删除事先加在部件或部件集合上的初始速度，使用 EDPVEL，LIST 和 EDPVEL，DELE 命令（在 GUI 中，路径为 Main Menu>Solution> Initial Velocity>-On Parts-List 或 Main Menu>Solution> Initial Velocity>-On Parts-Delete）。

CP 系列命令（CP，CPDELE，CPINTF，CPLGEN，CPLIST，CPNGEN，CPSGEN）可用来在一个结构的不同自由度（DOFS）间进行定义、修改、删除、列表和产生耦合。同样，CE 系列命令（CE，CEDELE，CEINTF，CELIST，CERIG）可在一个结构的不同 DOF 间定义、修改、删除、列出约束方程。在 ANSYS/LS-DYNA 的显式动态程序中，CP 和 CE 命令仅用于 UX，UY 和 UZDOFS（不允许旋转 DOFS）。

既然旋转 DOFS（UX，UY，UZ）不能使用，那么在显式分析中就不能用 CP 一系列的命令来模拟涉及旋转的刚体行为。如果使用了 CP 命令，将会导致非物理响应。

要注意到，包含非重合节点，或包含不沿耦合自由度方向节点的耦合设置不会产生力矩约束。这就意味着如果结构旋转，耦合的节点也会旋转。只有作用力和反作用力在模型中满足力矩平衡。对于耦合约束的每个节点，力矩结果与节点到固定中心的距离有关，位移方向与结果力矩有关。在某些情况下这可能导致非物理响应。

当模拟地理力学系统时，常常用一个有限域来表示地面或其他大的实体。对于这种分析，可以在模型外部使用非反射边界限制模型的整体尺寸。可以在以 SOLID164 单元模拟的有限域的表面上应用这些边界。非反射边界将防止在边界产生的人工应力波反射重新进入模型从而破坏结果。

当模型中包含非反射边界时，LS-DYNA 会根据线性材料行为假设计算所有边界部分的阻抗匹配函数。因此，需进行有限元网格划分从而使所有重要的非线性行为都包含在离散模型中。

要定义非反射边界，需选择沿 SOLID164 实体外表面（NSEL）组成所需边界的节点，然后定义一个节点组元（CM），用 EDNB 命令在这些节点组元上施加非反射边界，然后激活膨胀和剪切选项。用 EDNB，LIST 和 EDNB，DELE 来显示或删除定义的非反射边界。

在显式动态分析中，为了应用与温度有关的材料，或包括热应力的影响，可能需要定义温度载荷。温度载荷主要应用在 PLANE162，SHELL163 和 SOLID164 单元中。ANSYS/LS-DYNA 程序提供了几种温度载荷：

- 应用于节点组元的随时间变化的温度（EDLOAD）。
- 应用于模型中所有节点的常温度（TUNIF/BFUNIF）。
- 在顺序显式动态分析中，施加非均匀温度载荷（不随时间变化）的 ANSYS 热分析结果（LDREAD，要求顺序求解）。

第一种方法用 EDLOAD，TEMP 命令和一般的加载方法对给定的节点组元施加随时间变化的温度。但必须定义两个数组参数表示载荷：第一个包括时间值，第二个包括温度值。

可以用这些参数定义曲线或用 EDLOAD 命令直接输入。也可以用 EDLOAD 的 SCALE 参数来对这些温度值进行缩放。

第二种方法允许给模型中所有节点施加均匀不变的温度。这种方法用于模拟稳态热载荷的结构。也可以用 TUNIF 命令或 BFUNIF，TEMP 命令施加这种温度载荷。

第三种方法允许把 ANSYS 热分析中计算的温度作为载荷施加到显式动态分析中。这种方法对模拟与温度有关的现象是很有用的，比如锻造。应用这种方法，必须执行隐显顺序求解。在显式阶段，可以用 LDREAD 命令从热分析（隐）结果文件（Jobname.RTH）中读入温度数据，然后加到模型的节点上。在热分析中只能从指定的时间点转移这些温度。

对于这 3 种温度加载方法，可以用 TREF 命令输入参考温度。热载荷定义为施加温度和参考温度的差值。如果不定义参考温度，其默认值为零。

为了使温度载荷有效，必须使用温度相关双线性各向同性材料模型。忽略屈服强度和切向模量，可以用这个模型代表热弹性材料。

值得注意的是，温度加载的 EDLOAD 方法不能和 LDREAD 或 TUNIF/BFUNIF 方法混合使用。另外，EDLOAD 命令不能显示或删除 LDREAD，TUNIF 或 BFUNIF 施加的温度载荷。

在一个显动态分析中可以同时使用 LDREAD 和 TUNIF（BFUNIF）。LDREAD 命令把温度载荷施加到所选的节点上，覆盖了 TUNIF 或 BFUNIF 定义的任何温度载荷。LDREAD 没有选择的节点将采用 TUNIF 或 BFUNIF 命令定义的温度载荷。采用 BFDELE 命令，删除 LDREAD 定义的温度载荷，用 BFLIST 命令显示其定义的载荷。

为进行隐式-显式连续求解，已将动力松驰功能加入到 ANSYS/LS-DYNA 程序（EDDRELAX 命令）。真实的动力松弛（EDDRELAX，DYNA）是通过增加阻尼，使动能降为零，从而允许显式求解器进行静态分析。当隐式求解器用于提供预载荷时（EDDRELAX，ANSYS），可采用稍不同的方法，基于预加载的几何构型（也就是，由隐式求解得到的节点位移）进行应力初始化。在后一种情况中，显式求解器仅用 101 个时间步来施加预载荷。而在前一种情况，求解器每 250 个循环步（默认值）就检查动能直到预载荷动能耗散完毕。ANSYS/LS-DYNA 支持两种方法，它在零时间瞬态分析部分开始前，在虚拟时间内进行。EDLOAD 命令通过 PHASE 标记指定分析类型。

EDLOAD，ADD，Lab，Cname，Par1，Par2，PHASE

PHASE：

0 载荷曲线仅用于瞬态分析（默认值），或隐式-显式连续求解。

1 载荷曲线仅用于动力松弛。

2 载荷曲线仅用于瞬态分析和动力松弛。

与 ANSYS/LS-DYNA 的动力松弛有关的主要有 5 种不同的分析类型，现讨论如下：

- 仅瞬态动力分析（EDDRELAX，OFF）：在这种情况下，EDLOAD 命令的 PHASE 参数置为零。不采用动力松弛，这是默认设置。
- 仅应力初始化而没有瞬态分析（EDDRELAX，DYNA）：这种情况用 ANSYS/LS-DYNA 显式求解器近似求解静力分析，实际最好由隐式求解器，如 ANSYS 来处理。在 EDLOAD 命令中 PHASE 参数置为 1，终止时间（TIME 命令）必须置 0，以预防静载荷的卸载。采用实际的动力松弛。
- 无载荷瞬态分析的应力初始化（EDDRELAX，DYNA）：这种情况与前一种情况相

同，不同的是时间设置为所期望的值。在零时间时，结构立即卸载，自由振动。

- 有加载瞬态分析的应力初始化（EDDRELAX，DYNA）：它类似于前一种情况，不同的是用 EDLOAD 命令（借助于 PHASE=2）在虚拟时间进行动力松弛以获得预加载并在真实时间进行瞬态分析。如果用倾斜载荷曲线代替恒定载荷曲线，则结构在零时刻时卸载并重新加载。因此，如果显式求解器需要一个倾斜载荷曲线对静态求解精确收敛，那么较好的是使用两个 EDLOAD 命令。第一个（PHASE=1）用斜坡载荷曲线施加预载荷。而第二个（PHASE=0）不用斜坡载荷曲线继续加载。

注意，如果对同一个组元（或 PARTID）和同一个载荷标签多次执行 EDLOAD 命令，那么会用最后一个 EDLOAD 命令的值。对于给定的组元（PARTID）和载荷标签不能使用多个 PHASE 参数值。为符合这一设置，必须为应力初始化和瞬态曲线复制节点组元（这一工作区仅适用于用组元定义载荷）。

- 隐式-显式连续求解（EDDRELAX，ANSYS）：这种情况是用 ANSYS 隐式求解器施加预载荷以求得位移结果，作为预载荷施加 ANSYS/LS-DYNA 显示器解器的给定几何构型上，通过应力初始化得到预加载的几何实体。在 EDLOAD 命令中的 PHASE 必须置为 0。

11.1.5 显式动态分析求解

当模型建好后（即单元、实常数、材料性质的定义，建立模型、网格划分、边界/初始条件指定以及加载、结束控制），执行 SOLVE 命令即可以开始求解过程（在 GUI 中，菜单路径为 MainMenu>Solution>Solve）。

此时，ANSYS/LS-DYNA 程序将运行以下几步：

1）标题记录：包括几何特性（如节点和单元等），都写到相应的两个结果文件 Jobname.RST 和 Jobname.HIS 中。（此时 ANSYS/LS-DYNA 数据库中包含全部相应的信息。即在运行 SOLVE 命令前，必须执行 SAVE 命令，把所有的模型信息都写入到文件 Jobname.DB）。

2）将所有输入的信息写出 LS-DYNA 程序的输入文件 Jobname.K。

3）控制权由 ANSYS 程序转移给 LS-DYNA 程序。LS-DYNA 求解器运行的结果写入到结果文件 Jobname.RST 和 Jobname.HIS 中。如果执行 SOLVE 命令前给定命令 EDOPT，ADD,，BOTH，则也将输出用于 LS-POST 后处理程序的结果文件（d3plot 和 d3thdt 文件）。

当求解结束后，ANSYS/LS-DYNAGUI 将提醒用户求解已完成，控制权重新转回到 ANSYS/LS-DYNA 程序。可以通过 ANSYS/LS-DYNA 程序的 POST1 和 POST26 后处理器来查看结果。如果产生了错误或警告，输出窗口将自动显示弹出信息，表明有几个错误和警告。可以参考 LS-DYNA 的信息文件，其中详细记录了错误和警告。这些信息也同时被写入到 LS-DYNAd3hsp 文件。

LS-DYNA 求解终止点与建模时设定的终止控制有关。主要有以下几种终止控制类型。

- 终止时间：用 TIME 命令定义分析结束时间。时间步累积达到结束时间时计算就会停止。
- CPU 时间限制：可以用 EDCPU 命令指定 CPU 时间限制（以 s 为单位）。在达到时间限制时就会停止计算。

● 终止判据：当指定点和刚性体到达某一个特定位置，或一个指定点和其他表面发生接触，可以用 EDTERM 指定结束求解。可以用这个命令设定多个判据

一般用 TIME 命令指定分析结束时间。其他的终止控制都是可选的。程序遇到任何一个种终止判据时，求解都会停止。



当执行小型重新启动（EDSTART，2）或完全重新启动（EDSTART，3）时，如果以前的分析由于 EDTERM 设定的终止判据而终止，那么必须改变或删除这个判据，从而以免造成重启动立即终止。

对于大的模型，用户必须用 ANSYS/LS-DYNA 的共享存储器并行处理（SMP）功能来缩短分析所需的时间。要应用这一功能，一台机器上必须至少有两个处理器，并且必须申请合适的 ANSYS/LS-DYNASMP 授权号。

使用 SMP 功能需注意：

● 指定使用的处理器数。可以用 config60.ans 文件，/CONFIG 命令或 SETNPROC 宏来设定这个值。如果没有设定处理器数目大于一，那么在 GUI 中不能用合适的菜单选项来设定 SMP，EDRUN 命令设置也会变为无效。
● 执行 EDRUN 命令来定义 SMP 的运行。

当使用共享存储器并行处理时，根据每个 CPU 的利用率及工作量，计算将会以不同的顺序进行。基于此原因，在多次运行同一个文件时，可能会注意到结果间存在细微差别。为了避免这些差别，可以指定保持一致性，保持一致性将使 CPU 时间增加 15%。

如果在一个平台上使用所有的 CPU（ANSYS 建议运行的 CPU 数比可用的要少一个为好），并且应该关闭这些 CPU 所有其他的应用。任何与 ANSYS/LS-DYNA 在 SMP 运行模式应用相竞争的计算或机器资源都会显著影响 SMP 的性能。

当使用最多达 8 个处理器时，SMP 性能将线性提高。当多于 8 个处理器时，获得的附加性能提高都很小；问题越大，性能提升潜力也越大。

LS-DYNA 程序有几个控制开关，使得用户可以中断求解进程并检查求解状态。本节讲述怎样使用这些控制开关。

当 LS-DYNA 正在运行时，在 ANSYS/LS-DYNA 程序的操作窗口中输入 CTRL-C。它将中断 LS-DYNA 程序的运行，进入 ANSYS/LS-DYNA 操作的控制命令窗口（注意：与 ANSYS 不同，CTRL-C 并不会让用户脱离 ANSYS/LS-DYNA 的 GUI，LS-DYNA 求解器在此背景下继续进行）。

正如隐式方法和显式方法所述，ANSYS/LS-DYNA 将依据其材料特性和尺寸自动计算模型中每个单元的临界时间步长。模型中的总体时间步长将依据模型中所有单元的最小临界时间步长而定。

用户可以用 EDTP 命令根据时间步大小显式动态单元。这可以使监控模型中的小单元区域。根据时间步长有 3 个选项（EDTP 命令的 OPTION 域）用于显示单元：

● 选项 1：显示时间步长最小的单元。根据时间步大小每个单元呈红色或黄色。根据 EDTP 命令的 VALUE1 域确定所显示单元的数目（默认值=100）。
● 选项 2：用最小时间步长显示和列出单元。该选项和选项 1 产生同样的单元，并且可以显示最小单元。
● 选项 3：除了显示所选单元外，这个选项显示的单元和选项 1 一样。超出 VALUE1

指定数目的单元是蓝色及半透明的，其透明度与 EDTP 命令的 VALUE 域有关。

在 EDTP 产生的图中，根据其时间步大小，单元将会呈现红色（最小），黄色（中间），或蓝色（最大）。

注意，在大模型中使用 EDTP 命令时要注意，因为其时间步长的计算要花费很多的 CPU 时间。

ANSYS/LS-DYNA 程序支持 LS-DYNA 的大部分功能，并且可以由该程序的 GUI 界面得到。然而值得指出的是：还有一些 LS-DYNA 的功能不能从 ANSYS/LS-DYNA 的 GUI 中直接得到，例如：

- 一些材料特性，如纤维，土壤等。
- 某些单元类型，如 SEATBELT。
- 在局部坐标系下对刚体的约束。

虽然这些功能不能直接使用，但熟悉 LS-DYNA 程序的用户仍然可以从 ANSYS/LS-DYNA 程序中间接地使用这些功能，这些方法将简述如下。

当模型建好后，执行 EDWRITE 命令（在 GUI 中，菜单路径为 MainMenu>Solution>WriteJobname.k.）创建一个 LS-DYNA 输入文件 Jobname.k.（注意到，如果为小型重启动，输入文件命名为 Jobname.R 如果为全启动，输入文件命名为 Jobname_nn.K）。

EDWRITE 和 SOLVE 命令的区别就是本章开始讨论的求解过程中的第三步将不运行。也就是说，只写出 Jobname.k（还有 ANSYS 结果文件的标题），但是，LS-DYNA 程序将不会开始求解。

执行 EDWRITE 命令后，在显动态分析中，可以使用包含附加功能的下列任一种方法进行求解。

（1）方法 A

1）退出 ANSYS/LS-DYNA 程序。

2）编辑 LS-DYNA 文件 Jobname.k 中在 ANSYS/LS-DYNA 程序不能直接得到的部分。

3）在两个结果文件 Jobname.RST 和 Jobname.HIS 存在的目录下执行 LS-DYNA，LS-DYNA 程序运行得到的结果将加入到这两个文件中。

4）当 LS-DYNA 程序运行完以后，进入 ANSYS/LS-DYNA 程序，用后处理器（POST1 和 POST26）查看结果。

（2）方法 B

1）使用另一个窗口，进入到 ANSYS/LS-DYNA 程序运行的目录下，在原窗口下并不退出 ANSYS 程序。

2）编辑输入文件 Jobname.k 中从 ANSYS/LS-DYNA 程序不能直接得到的部分。

3）在相同的目录下另外运行 LS-DYNA 程序（该目录下有结果文件 Jobname.RST 和 Jobname.HIS）。求解结果将加入到这些结果文件中，但并没有退出 ANSYS/LS-DYNA 的原始窗口。

4）当 LS-DYNA 程序运行结束后，回到原来的窗口里，用 ANSYS/LS-DYNA 的后处理观看结果。

当使用这些方法修改 Jobname.k 文件时，节点和单元都不能改变。同时也注意到 ANSYS/LS-DYNA 中的数据库并不因 Jobname.k 文件的改变而更新。因此，当求解完成后，

用 PREP7，POST1，POST26 处理器进行观看时，看到的是初始模型而并不是修改后的模型（因此，编辑关键输入文件 Jobname.k 不是 ANSYS/LS-DYNA 所支持的特性）。不管什么情况下，LS-DYNA 后处理器 LS-POST 能处理完整的计算结果（假设通过 EDWRITE 命令执行 LS-DYNA 结果文件）。

11.1.6 显式动态接触分析

ANSYS/LS-DYNA 中的接触表面可以使用户在模型中诸 Component 之间定义多种接触类型。必须注意的是显式动态分析中的接触与其他类型的 ANSYS 分析中的接触类型不同，在其他分析中，接触是由实际接触单元表示。而在显式动态分析中没有接触单元。只需定义接触表面，它们之间的接触类型以及相应的参数。

因为在显式动态分析中会发生复杂的大变形，所以确定模型内 component 之间的接触是非常困难的。基于此原因，ANSYS/LS-DYNA 程序中包含了许多功能可以使接触表面间的接触定义更容易些。在 ANSYS/LS-DYNA 中采用 EDCGEN 命令来定义所有接触表面。

使用 EDCGEN 命令时遵循下列步骤：

- 确定哪种接触类型最适合的物理模型。
- 定义接触实体。
- 定义摩擦系数参数。
- 为给定的接触类型给定一些附加输入。
- 定义接触的杀死和激活时间。

（1）定义接触类型

为了充分地描述在大变形接触和动态撞击中的复杂几何体之间的相互作用，在 ANSYS/LS-DYNA 中引入了许多种接触类型。这些接触类型包括节点-表面、表面-表面、单面、单边、侵蚀、固连、固连断开、压延筋和刚性体接触，对于一般的分析而言，建议使用自动单面（ASSC）、自动原则（AG）、节点-表面（NTS）、表面-表面（STS）接触选项。

（2）定义接触实体

除单面接触（ASSC，SS 和 ESS）、自动通用（AG）和单边接触（SE）外，所有的接触类型都必须在发生接触的地方定义 contact 表面和 target 表面，这可用节点 components、PARTID 或部件集合 ID 定义。

此外，还可以用有限元模型内当前定义的部件号或部件集合号来定义接触表面。部件集合号可以用 EDASMP 命令定义。

下面的命令行说明了怎样使用 EDCGEN 命令在模型中定义不同部件或部件集合间的接触；

```
EDCGEN，STS，1，2，. 25，. 23          !在部件 1 和部件 2 间生成面面接触。
```

另外，结合 PART/部件集合和组元定义，也可以定义接触和目标表面间的接触，表述如下：

```
EDCGEN，NTS，N1，2，. 3，. 28         !在组元 N1 和 PART2 间生成点面接触。
EDCGEN，ESTS，1，N2，. 15，. 15       !在 PART1 和组元 N2 间生成侵蚀面面接触。
EDCGEN，STS，1，1，. 1，. 1           !在 PART1 间生成面面接触。
```

如下例所述，也可以用 EDCGEN 命令定义部件集合间的接触：

```
EDCGEN，STS，5，6，. 3，. 28          !在部件集合 5 和 6 间生成面面接触。
```

在一些特定的单面接触类型（ASCC，AG，ESS，和 SS）中无须定义 contact 和 target 表面，在本章后面将提及，单面接触时最常用的接触类型，模型的全部外表面在整个分析中任一点都可能发生接触。程序在单面接触中将忽略任何 contact 和 target 表面的定义，并在执行 EDCGEN 命令时发出一个警告信息，一个典型单面接触命令如下：

```
EDCGEN，ASSC，，，. 34，. 34            !在整个模型中生成自动单面接触。
```

注意，在显式分析中定义接触实体时，不允许有初始穿透。因此，定义接触组元时要注意。

（3）定义摩擦系数参数

接触摩擦系数是由静态摩擦系数（FS），动摩擦系数（FD）和指数衰减系数（DC）来确定的。（FS，FD 和 DC 可以用 EDCGEN 命令输入）假设摩擦系数与接触表面的相对速度有关：

$$\mu_c = FD + (FS - FD)\mathrm{e}^{-DC \cdot V_{\mathrm{rel}}}$$

粘性摩擦系数，VC（用 EDCGEN 命令输入），可以限制最大摩擦力。公式表述如下：

$$F_{\lim} = VC \times A_{\mathrm{cont}}$$

这里 A_{cont} 是接触时节点接触部分的接触面面积，VC 值建议使用剪切屈服应力：

$$VC = \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

这里 σ_0 是接触材料的屈服应力。

为了避免在接触中产生不真实的振荡，对于薄板成形模拟，可使用垂直于接触表面的接触阻尼，接触阻尼系数计算如下：

阻尼系数 $\xi = \dfrac{VDC}{100} \times \xi_{\mathrm{cnt}}$

VDC——粘性阻尼系数（EDCGEN 命令输入）。

$$\xi_{\mathrm{cnt}} = 2m\omega$$

这里 $m = \min(m_{\mathrm{slave}}, m_{\mathrm{master}})$， $\omega = \sqrt{k \times \dfrac{m_{\mathrm{slaver}} + m_{\mathrm{master}}}{m_{\mathrm{slaver}} \times m_{\mathrm{master}}}}$ ，K 是界面刚度。

（4）给定附加输入

对于侵蚀、刚性体、固连断开和压延筋接触，还需输入一些其他数据（EDCGEN 的 V1-V4 选项），这些数据因接触类型不同而各异，将分别简述如下：

采用侵蚀表面接触（ENTS，ESS 和 ESTS）时，当表面实体单元发生失效时，需要在内部剩余单元重新定义接触。对于侵蚀接触，V1～V3 定义如下：边界条件对称选项（V1）决定当单元表面失效时沿一个表面是否仍然保持对称性；内部侵蚀选项（V2）决定当外表面发生失效时沿内表面是否接着发生侵蚀；相邻材料选项（V3）决定当沿着自由表面发生失效时是否包括实体单元面。

刚性体接触（RNTR 和 ROTR）通常用于多刚体动力学，在刚性体接触中，采用一条用户定义防止贯穿的力-挠度曲线，而不用线性刚度。因此，对于刚性体接触，数据曲线号（V1），用于给定刚性体接触的力计算方法；类型选项（V2）和卸载刚度值（V3）

必须输入。

固连断开接触（TSTS 和 TNTS）用于表面胶合在一起时定义接触表面失效。对于所有固连断开接触类型，需输入拉伸失效应力（V1）和剪切失效应力（V2）定义失效准则。对于节点-表面固连断开接触。法向力指数项（V3）和剪切力指数项（V4）也需输入以定义失效准则。

压延筋接触（DRAWBEAD）用于模拟压延筋的特殊情况，压延筋在深拉作业时有助于约束坯料。在压延筋接触中，必须输入一条载荷曲线号（V1），它给出作为压延筋位移函数的约束力弯曲分量，可以任选一条曲线号（V2），它给出作为压延筋位移函数的法向约束力以及沿压延筋的等距积分点数（V4）。

（5）定义激活或杀死时间

对于每个接触定义，都可以用 EDCGEN 命令的 BTIME 域和 DTIME 域来定义杀死和激活时间。这允许在瞬态分析的任意时刻都激活接触，然后在稍后时间内杀死。

用 EDCGEN 命令定义接触后，就可以列表、显示或删除接触实体。用 EDCLIST 命令列出所有当前定义的接触实体。定义的每个接触都给定一个参考号用于显示接触实体。

当前显式动态接触实体。

1 表示一般的面面接触：节点接触实体 N1，结点目标实体 N2。

FS=0.10000FD=0.08000DC=0.00000VC=0.00000VDC=0.0000。

2 表示自动单面接触定义：模型的所有外表面。

FS=0.20000FD=0.15000DC=0.00000VC=0.00000VDC=0.0000。

用户可以采用 EDPC 命令选择和显示接触实体。显示将包括节点和单元，它与定义接触表面的方法有关（也就是说，部件或组元）。采用 EDPC 命令的 MIN，MAX，和 INC 域来给定最小接触实体号，最大接触实体号和接触实体号增量。因此，对于上述说明执行 EDPC，1，2，1，就可以选择显示 STS 和 ASSC 接触定义的实体。值得注意的是，对于单面接触定义，模型中所有外部表面都将被选择和显示出来。

注意，EDPC 选择了给定接触实体的节点和单元。因此，在显示接触实体后，必须重新选择下步操作所需的所有节点和单元（SOLVE）。采用 NSEL，ALL 和 ESEL，ALL 命令（或其他命令的合适形式）。

如果接触定义不正确，可以用 EDDC 命令删除它。为了删除指定的接触实体，可执行 EDDC，DELE，Ctype，Cont，Targ，这里 Ctype 是接触类型，Cont 和 Targ 表示已定义接触的接触和目标部件或组元。删除当前接触实体，执行 EDDC，DELE，ALL 命令。

在小型重启动分析中不能删除接触实体（EDSTART，2）。但是，可以用 EDDC 命令激活（EDDC，DACT，Ctype，Cont，Targ）或杀死接触。当知道在什么阶段发生什么类型接触时，这个特点是非常有用的。要使用此特征，必须在新分析中定义所有的接触实体（EDCGEN），并且必须至少执行一次小型启动，一旦定义了接触类型，就可以在不必要时杀死它，而在需要时重新激活。需要时才考虑接触，这样显著节省了 CPU 时间。（注意，如果在新分析中用 EDDC，DELE 删除接触，它的定义将从数据库中去除，那么就不能在后来的分析中激活它。）

显式动态全启动分析不支持 EDDC 命令（EDSTART，3）。也就是说，在前面分析已定义的全启动中不能删除，杀死和激活接触定义。

如表 11-2 所示，在 ANSYS/LS-DYNA 程序中主要有 3 种基本接触类型：单面接触、节点-表面接触、表面-表面接触。

表 11-2 接触类型

	单面接触	点-表面接触	表面-表面接触
Normal	SS	NTS	STS，OSTS
Automatic	ASSC，AG，ASS2D	ANTS	ASTS
Rigid		RNTR	ROTR
Tied		TDNS	TDSS，TSES
Tied with failure		TNTS	TSTS
Eroding	ESS	ENTS	ESTS
Edge			SE
Drawbead		DRAWBEAD	
Forming		FNTS	FSTS，FOSS

- 单面接触（SS，ASSC，AG，ASS2D，ESS）

单面接触用在一个物体表面的自身接触或它与另一个物体表面接触，在单面接触中，ANSYS/LS-DYNA 程序将自动判定模型中哪处表面发生接触。因此，单面接触的定义是最简单的，无需定义 contact 和 target 表面，当定义好单面接触时，它允许一个模型的所有外表面都可能接触，这对于预先不知道接触表面的自身接触或大变形问题很有用处。与隐式模型过多定义接触面将大大增加 CPU 时间不同，在显式模型中定义单面接触只会较少的增加 CPU 时间，许多碰撞和撞动态碰撞问题都需定义单面接触。由于自动通用接触（AG）很有效，它包括壳边接触（SE）和改进的梁接触，因此，推荐在难以预测接触条件时，对于自身接触和大变形问题优先选择此种接触类型。

- 点-面接触（NTS，ANTS，RNTR，TDNS，TNTS，ENTS，DRAWBEAD，FNTS）

点-面接触类型是接触节点将穿透 target 表面。这种接触类型通常用于一般两个表面间的接触。采用 ANSYS 隐式程序中同样的规则，需要定义 target 表面及 contact 表面。

平面或凹面为 target 表面，凸面为 contact 表面；粗网格所在面作为 target 面，细网格所在面为 contact 面；在定义压延筋接触时，筋总为 contact 表面，而板料为 target 表面。

- 面-面接触（STS，OSTS，ASTS，ROTR，TDSS，TSTS，ESTS，SE，FSTS，FOSS，TSES）

当一个物体的表面穿透另一个物体的表面时需使用面-面接触，面-面接触类型是最常用的，并且常用于任意形状且存在较大接触面积的物体接触。这种接触类型对于物体间有大量相对滑移时很有效，例如块在平板上滑动，球在槽内滑动等。

对于以上 3 种接触类型的每一种又含有多个接触类型选项，在 ANSYS/LS-DYNA 中，可用以下几个选项：

- 通用接触（SS，NTS，STS，OSTS）

虽然通用接触的算法最简单，但它的使用范围仍很广。实际上，ANSYS/LS-DYNA 的 3 种接触选项中有两种是 NTS 和 STS 选项。使用通用接触最大的优点在于它们的速度很快并且很可靠。使用该种类型时，只需关心接触表面的取向，接触表面方向是指定义一个面的哪

一边是实体和哪一边是“空气”。当使用实体单元时，程序自动为通用接触类型正确定向，而对于壳单元的接触，用户必须自己定义表面方向，在 EDCONTACT 命令中把 ORIE 域设为 2，它将激活接触表面自动重新定向。特别要注意，只有壳表面没有初始贯穿时才会重新定向。



● 自动接触（ASSC，AG，ASS2D，ANTS，ASTS）

与通用接触类型一样，自动接触也是使用最广泛的接触。自动接触和通用接触间的主要差别就是它能通过自动接触算法自动确定壳单元的接触表面方向。在该选项中，将会检查壳单元每个面的接触，因此，通常会限制搜索深度。如果考虑到接触表面的穿透，可以使用无限或者大搜索深度的普通接触。

● 侵蚀接触（ESS，ENTS，ESTS）

侵蚀接触用于一个或两个表面的单元在接触时发生材料失效。接触依然可在剩余单元中进行。它用于实体单元穿透或是表面产生失效贯穿问题等。使用此选项，必须在 EDCGEN 命令中指定对称平面选项（V1）、内外节点侵蚀选项（V2）以及临近材料处理选项（V3）。

● 刚性接触（RNTR，ROTR）

刚性体接触和通用接触中的 NTS 和 OSTS 相类似，区别在于它采用一条用户自定义的力-挠度曲线而不是线性刚度来防止穿透。这种类型的接触最典型的应用是多个刚体间的相互接触。刚性体接触的最大优点在于它们可以包括能量吸收而无需用变形单元建模。但是，刚性体接触（RNTR，ROTR）不能用于变形体。刚性体和变形体间的接触必须用通用、自动或侵蚀选项来定义。对于刚性体接触选项，必须用 EDCGEN 命令来指定数据曲线 ID（V1）力的计算方法（V2）和卸载选项（V3）。

● 固连接触（TDNS，TDSS，TSES）

固连接触选项实际上是把接触节点（表面）和目标表面“粘合”起来，接触和目标表面开始必须共面，于是初始化时，程序会计算 contact 节点（表面）在 target 部分内的等参数位置。然后，在载荷或初始速度的作用下，contact 节点（表面）须在目标表面内保持它们的等参数位置。固连接触的效果就是 target 表面可以变形，而 contact 节点将追随其变形。定义固连接触时，较粗网格的物体需定义为 target 表面。只有平移自由度（UX，UY，UZ）才会受固连接触的影响。

● 断开接触（固连失效）（TNTS，TSTS）

固连断开接触与固连接触的区别在于 contact 节点（表面）仅在达到失效准则前和 target 表面固连在一起。利用一个罚刚度使得 contact 节点（表面）与 target 表面实现“销联接”；在达到失效准则后，接触节点（表面）可以相对于目标表面滑动或与之分离。固连断开接触的典型应用是焊点和螺栓联接。TNTS 和 TSTS 间的主要区别就是 TSTS 失效与失效应力有关而 TNTS 则与失效力有关。使用 TSTS 时，需用 EDCGEN 命令来定义法向（V1）和切向（V2）失效应力；对于 TNTS，需用 EDCGEN 命令来定义法向（V1）和切向（V2）失效力以及法向（V3）和切向（V4）力的指数。固连失效准则如下式：

$$\left[\frac{|f_n|}{f_{\text{nfail}}}\right]^{m_1}+\left[\frac{|f_s|}{f_{\text{sfail}}}\right]^{m_s}\geqslant 1$$

● 边接触（SE）

单边接触用于发生在垂直于壳表面法线方向的接触中。该接触选项不需要定义接触或目标表面，常用于表面法向垂直于撞击方向的薄板成形工艺中。

- 压延筋接触（DRAWBEAD）

压延筋接触用于金属成形工艺中，它需特别注意坯料的约束。在拉延和冲压模拟时，板料与成形表面脱离的现象是很常见的。压延筋接触要求使用弯曲和摩擦约束力，用来保证板料在整个压延筋厚度尺寸上保持接触。

- 成形接触（FNTS，FSTS，FOSS）

成形接触主要用于金属成形工艺。对这些接触类型来说，工具和模具定义为目标面（master），而工作部分定义为接触面（slave）。这个选项不需用网格连接，但工具的网格必须在同一方向。由于该选项基于自动接触类型，因此在金属成形应用中非常有效。

用壳单元对刚性体建模时必须很小心。自动点-面接触（ANTS）、自动单面接触（ASSC）、自动面-面接触（ASTS）和单面接触的定义，都必须考虑确定接触表面和搜索深度接触算法的壳体厚度。因此，刚性体壳单元的厚度要符合实际，厚度太小将导致接触丢失，厚度太大将导致批处理算法速度的降低。对上述接触类型来说，EDCONTACT 命令的壳体厚度接触选项 SHTK 域将忽略不计。

EDCONTACT 中 SHTK 项置为 1 或 2 对 NTS，STS，OSTS 型接触有多种影响。第一就是直接计算接触深度，它由壳单元厚度和实体单元边长决定，而不由用户控制。第二，正如上面所说的一样，接触搜索算法变为批处理算法，网格连续就不必要了。

对于通用接触类型 STS，NTS，OSTS，TNTS 和 TSTS，用户必须保证在模型中未定义虚假接触。对于这些接触类型，ANSYS/LS-DYNA 假设接触深度为1×10^{10}（接近无限）。因此，任何时候一个接触节点贯穿到 target 表面的后面（或 vice-versa），就会发生接触并产生一个与接触深度成比例的力。在显式动态分析中，由于几何体之间发生相对移动，定义多余的虚假接触是很常见的。在接触不真实的情况下，接触深度相对来说就很大，相应的接触力也会变大从而导致模型不稳。基于上述原因，ANSYS/LS-DYNA 程序允许用户定义一个最大接触深度值，接触穿透超过该值，可认为是虚假的并且对它忽略不计。要控制接触穿透距离，可将 EDCONTACT 命令中的 PENCHK 域值为 1 或 2。

在 STS，NTS，OSTS，TNTS 和 TSTS 类型的模型中，上面所说的 PENCHK 域控制所有接触定义的穿透检测。用 EDSP 命令可以改变同种类型每个单独接触定义的穿透检测。

除 STS，NTS，OSTS，TNTS 和 TSTS 外的所有其他类型的接触，其穿透深度由单元厚度自动限制，而不能由用户自动调整。壳单元和实体单元接触深度的表达式为：

壳单元：接触深度=min[壳厚度，0.4×最短边长，$0.5\times\sqrt{area}$]。

实体单元：接触深度=min[体积/面积，$0.5\times\sqrt{area}$]。

两个物体间发生接触时必须建立刚度的关系。如果没有接触刚度，物体之间将会互相穿透。通过两个物体间的“弹性弹簧”可以建立这种关系，这里接触力等于接触刚度（k）与穿透量（δ）的乘积。因此，两个物体间的穿透量（δ）或不相容性与刚度 k 有关。理想情况下，应没有穿透，但这意味着 $k=\infty$ 从而将导致数值不稳。k 值与接触物体的相对刚度有关。在 ANSYS/LS-DYNA 程序中，接触刚度由下述关系确定。

实体单元片：

$$k = \frac{\text{fs} \times \text{Area}^2 \times \text{K}}{\text{Volume}}$$

壳单元片：

$$k = \frac{\text{fs} \times \text{Area} \times \text{K}}{\text{MinimumDiagonal}}$$

其中，Area=接触面积；K=接触单元的体积模量；fs=罚因子（默认为 0.1）。

在大多数情况下，ANSYS/LS-DYNA 程序自动确定的接触刚度参数能提供良好的结果。也可以通过 EDCONTACT 命令中的 SFSI 域输入新的罚因子值来改变所有接触面的接触刚度。由经验可知，SFSI 值超过 0.1 将会引起不稳定。

如果由于材料性质或单元尺寸的差别而在接触和目标表面间引起接触应力的不匹配，可能导致不稳定和不切实际的情况。它可以通过调整 EDCONTACT 命令中罚刚度选项 PENO 来克服。例如，把 PENO 置为 1，接触和目标面的刚度都将被考虑，并采用表面间的最小应力值。

如果接触刚度有很大差别，程序将它们进行比例缩放，使它们的数值接近，并覆盖用户输入的比例因子。

连同相对质量，闭合接触单元是一个弹簧-质量系统，其当前稳定性判据会得出显式分析的极限时步。程序会报告一个最小时步信息。如果采用的实际步长大于信息中所列出的，则要用 EDCONTACT 命令修改不协调表面的罚函数比例，或者用 EDCTS 命令缩小实际步长。若两个时步间的差别很小，则不必用此方法。

除了用 EDCONTACT 命令的 SFI 和 PENO 选项来控制接触表面间的罚刚度外，个别接触（从）和目标（主）的刚度值也可以用 EDCMORE 命令调整。EDCMORE 命令与 EDCONTACT 命令的区别在于，EDCONTACT 命令适用于模型中所有的接触，而 EDCMORE 命令只允许定义单个接触表面的附加接触参数。在 ANSYS/LS-DYNA 程序确定的默认刚度值不够的情况下，可以用 EDCMORE 命令的 Va1 和 Va2 域调整主从罚刚度。

为了定义 PLANE162 单元的接触，在 ANSYS/LS-DYNA 程序中存在一个特定的二维接触选项。ASS2D 是一个单面接触选项（和 ASSC 类似）。与三维单元所用接触相类似，可以用 EDCGEN 命令来定义 ASS2D 选项：

```
EDCGEN，ASS2D，Cont，Targ，FS，FD，DC，…BTIME，DTIME
```

对于二维接触，只有 parts 可以用来定义接触和目标组元。使用 ASS2D 仅可使用 FS，FD，DC，BTIME，DTIME 域。在二维接触中，EDCGEN 命令的所有其他域都将被忽略。

11.1.7 显式动态分析的材料模型

ANSYS/LS-DYNA 包括 40 多种材料模型，它们可以表示广泛的材料特性，可用材料如下所示。括号内将列出与每种模型相对应的 LS-DYNA 材料号。

线弹性模型：

- 各向同性（#1）。
- 正交各向异性（#2）。
- 各向异性（#2）。
- 弹性流体（#1）。

- 非线弹性模型。
- Blatz-koRubber(#7)。
- Mooney-RivlinRubber(#27)。
- 粘弹性（#6）。

非线性无弹性模型：

- 双线性各向同性（#3）。
- 与温度有关的双线性各向同性（#4）。
- 横向各向异性弹塑性（#37）。
- 横向各向异性 FLD（#39）。
- 随动双线性（#3）。
- 随动塑性（#3）。
- 3 参数 Barlat（#36）。
- Barlat 各向异性塑性（#33）。
- 与应变率相关的幂函数塑性（#64）。
- 应变率相关塑性（#19）。
- 复合材料破坏（#22）。
- 混凝土破坏（#72）。
- 分段线性塑性（#24）。
- 幂函数塑性（#18）。
- 压力相关塑性模型
- 弹-塑性流体动力学（#10）。
- 地质帽盖材料模型（#25）。

泡沫模型：

- 闭合多孔泡沫（＃53）。
- 粘性泡沫（#62）。
- 低密度泡沫（#57）。
- 可压缩泡沫（#63）。
- Honeycomb（#26）。

需要状态方程的模型：

- Bamman 塑性（#51）Johnson-Cook 塑性（#15）。
- 空材料（#9）。
- Zerilli-Armstrong（#65）。
- Steinberg（#11）。

离散单元模型：

- 线弹性弹簧。
- 普通非线性弹簧。
- 非线性弹性弹簧。
- 弹塑性弹簧。
- 非弹性拉伸或仅压缩弹簧。

● 麦克斯韦粘性弹簧。
● 线粘性阻尼器。
● 非线粘性阻尼器。
● 索（缆）（#71）。



刚性体模型：
● 刚体（#20）。

用户可以采用 ANSYS 命令 MP，MPTEMP，MPDATA，TB，TBTEMP 和 TBDATA 以及 ANSYS/LS-DYNA 命令 EDMP 来定义材料模型。通过 GUI 路径定义材料模型比使用命令直接得多：

● 选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models.Define Material Model Behavior 对话框出现。

注意，如果不事先定义 ANSYS/LS-DYNA 单元类型，那么就不能定义 ANSYS/LS-DYNA 材料模型。

● 在 MaterialModelsAvailable 窗口的右侧，双击 LS-DYNA，然后选择一种材料模型种类：线性、非线性、状态方程、离散单元特性或刚体材料。
● 双击一种材料的子目录。例如，在非线性材料中，有弹性、非弹性和泡沫材料模型。
● 双击下面的材料分类直到数据输入对话框出现。框中的选项包括所有的材料模型，它对所选的材料模型都有效。
● 输入所需的值，单击 OK 按钮。然后在 Materials Models Defined 窗口左边就列出了材料模型的类型和号码。
● 然后用户可以双击 Materials Models Defined 窗口左边的材料模型使相关数据对话框出现。这样就可以修改其值。然后单击 OK 按钮。

用户可以选择 Edit>Copy 并指定新模型号来复制现有材料模型的内容，复制的材料模型以新模型号列在 MaterialsModelsDefined 窗口左侧，其内容与源材料模型内容相同。

单击模型号选定它，然后选择 Edit>Delete，可以删除材料模型。

如果用户通过 GUI 路径来定义、修改、复制或删除材料模型，ANSYS 将自动发出正确命令并将其写入 log 文件中。

当采用交互工作方式时，所有材料模型的可用特性都出现在材料模型对话框中。当使用批处理或命令流方式时，相应的命令都提供在这里。要保证定义材料属性为模型列出的，不要定义与模型无关的数据。

各向同性弹性模型。使用 MP 命令输入所需参数：
● MP，DENS——密度。
● MP，EX——弹性模量。
● MP，NUXY——泊松比。

正交各向异性弹性模型。用 MP 命令输入所需参数：
● MP，DENS——密度。
● MP，EX——弹性模量（EY，EZ）；需一值。
● MP，NUXY——从泊松比（NUXY，NUXZ）；需一值。
● MP，PRXY——主泊松比（PRYZ，PRXZ）；需一值。

● MP，GXY——剪切模量（GYZ，GXZ）;需一值。

当仅给定一个值时（如 EX）其他值将自动定义（EY=EZ=EX）。用 EDLCS 和 EDMP，ORTHO 命令定义材料坐标系统。如果没有给定材料坐标系统，材料特性将单元的 I，J，L 节点定义的材料轴保持正交各向异性。对于多层复合壳，用 TB，COMP 命令代替，并作为 SHELL163 单元实常数给定层性质。

各向异性弹性模型的描述需要全弹性矩阵。由于其对称性，仅需 21 种常数。这种材料仅对 SOLID164 单元和 PLANE162 单元有效（轴对称和平面应变问题）。

用 MP 命令输入密度。用 TB，ANEL 命令以上三角形式输入常数。用 EDLCS 和 EDMP，ORTHO 命令定义材料方向轴。如果没有定义材料坐标系，材料性质将与单元的 I、J、L 节点所定义的材料轴保持正交各向异性。

● MP，DENS——密度。
● TB，ANEL。
● TBDATA，1，C11，C12，C22，C13，C23，C33。
● TBDATA，7，C14，C24，C34，C44，C15，C25。
● TBDATA，13，C35，C45，C55，C16，C26，C36。
● TBDATA，19，C46，C56，C66。

当用户使用 TBLIST 显示材料类型的数据信息时，这些常数以下三角形式[D]出现而不是上三角形式[C]。这一矛盾不是计算错误；材料数据已准确传递给 LS-DYNA 程序。

弹性流体模型用于模拟动态冲击载荷作用下盛满流体的容器。可以用 MP 命令输入密度（DENS），用 EDMP 命令定义材料模型为弹性流体：

MP，DENS。

EDMP，FLUID，MAT，VAL1。

流体模型要求指定体积模量，可以在上述命令的 VAL1 域输入。除了使用 EDMP 外，用户也可用 MP 命令输入弹性模量（EX）和泊松比（NUXY）。然后程序将计算体积模量如下所示：

MP，EX

MP，NUXY

$$K = \frac{E}{3(1-2v)}$$

如果 VAL1（EDMP 内）、EX 和 NUXY 都指定了，VAL1 将用作体积模量。

Blatz-ko 弹性橡胶模型使用第二类 Piola-Kirchoff 应力：

$$S_{ij} = G\left[\frac{1}{V}C_{ij} - V^{\left(\frac{1}{1-2v}\right)}\delta_{ij}\right]$$

式中，G 是剪切模量；V 是相对体积；v 是泊松比；C_{ij} 是右柯西-格林应变张量；δ_{ij} 是 Kronecker delta。用 MP 命令输入密度（DENS）和剪切模量（GXY）。

不可压缩橡胶模型。它与 ANSYS 的 Mooney-Rivlin 2 参数模型很相似。输入 C_{10}，C_{01} 来定义应变能量密度函数：

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I2 - 3) + \left[\frac{1}{I_3^2} - 1\right] + D(I_3 - 1)^2$$

$$C = \frac{C_{10}}{2} + C_{01}$$

$$D = \frac{C_{10}(5v - 2) + C_{01}(11v - 5)}{2(1 - 2v)}$$

I_1，I_2和I_3是右柯西-格林张量不变量。

用 MP 命令输入泊松比（v）和密度（泊松比的值要比推荐的大一些，太小的值不能工作）。用 TB 和 TBDATA 命令输入 Mooney-Rivlin 常数，只允许一种温度下的数据，并且必须放在数据表中的 1 和 2 位置。

TB，MOONEY，，，，0

TBDATA，1，C_{10}

TBDATA，2，C_{01}

如果不直接输入C_{01}和 C_{10}，可以设这些常数为 0，然后用载荷曲线提供表格式单轴数据。程序将根据 TBDATA 命令的 3～6 项所输入的实验数据来计算这些常数。使用这种输入法，必须设 TB 命令的 TBOPT=2：

TB，MOONEY，，，，2。

TBDATA，1，C_{10}（设为 0，应用实验数据）。

TBDATA，2，C_{01}（设为 0，应用实验数据）。

TBDATA，3，C_3（试样测量长度 L_0）。

TBDATA，4，C_4（试样测量宽度）。

TBDATA，5，C_5（试样厚度）。

TBDATA，6，C_6（载荷曲线 ID）。

提供单轴数据的载荷曲线应使测量长度随相应力的变化而变化。在压缩中，力和长度变化须为负值。在拉伸中，力和测量长度变化须为正值。单轴方向的主拉伸比λ_1由下式给出：

$$\lambda_1 = \frac{L_0 + \Delta L}{L_0}$$

式中，L_0是初始长度；L是实际长度。

或者可以通过设定测量长度、设置厚度和宽度为 1.0，并且在测量长度变化处定义工程应变以及在有作用力的地方定义名义（工程）应力，从而输入应力-应变曲线。

在 ANSYS/LS-DYNA 求解的初始阶段，用最小二乘法来处理输入的实验数据。

Herrmann 和 Peterson 提出的线性粘弹性模型采用偏量特性：

$$\sigma_{ij} = 2\int_0^t \phi(t - \tau)\left[\frac{\partial \varepsilon'_{ij}(\tau)}{\partial \tau}\right]\mathrm{d}x$$

这里剪切松弛模量由下式给出：

$$\phi(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)\mathrm{e}^{-\beta t}$$

在模型中，由体积 V 计算增量积分压力时，需事先进行弹性体积假设，即 V：p=K。用参数G_∞、G_∞、K（体积模量）和 β 来定义线粘弹性模型。用 TB，EVISC 和 TBDATA 命令的 46、47、48 和 61 项输入以上数据：

TB，EVISC。

TBDATA，46，G_0。

TBDATA，47，G_∞。

TBDATA，48，K。

TBDATA，61，1/β。

注意，对于这种材料选项，必须用 MP 命令定义密度（DENS）。

双线性各向同性模型使用两种斜率（弹性和塑性）来表示材料应力应变行为的经典双线性各向同性硬化模型（与应变率无关）。仅可在一个温度条件下定义应力应变特性（也有温度相关的本构模型；参看 Temperature Dependent Bilinear Isotropic Model）。用 MP 命令输入弹性模量（Exx），泊松比（NUXY）和密度（DENS），程序用 EX 和 NUXY 值计算体积模量（K）。用 TB 和 TBDATA 命令的 1 和 2 项输入屈服强度和切线模量：

TB，BISO。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

与温度相关的双线性各向同性模型是应变率无关，用两种斜率（弹性和塑性）来表示材料应力应变特性的经典双线性各向同性硬化模型。可以在 6 个不同的温度下定义应力应变行为。如果仅在一个温度下定义应力应变行为，就需假定双线性各向同性材料模型（与应变率和温度无关）。可以通过输入较大的屈服强度值来以该模型、表热-弹性材料。

用 MP 命令输入密度（DENS）（温度无关）。用 MPTEMP 和 MPDATA 输入弹性模量（Exx）、泊松比（NUXY）和热胀系数（ALPX）（这些特性和温度有关）。用 TB，BISO，，NTEMP、 TBTEMP 以及 TBDATA 命令的 1 和 2 项输入屈服强度和切线模量。屈服强度和切线模量必须相对于同一温度定义，在 MPTEMP 命令中输入。

MP，DENS。

MPTEMP，1，$temp_1$，$temp_2$，…，$temp_{ntemp}$。

MPDATA，EX，，1，EX_1，EX_2，…，EX_{ntemp}。

MPDATA，NUXY，，1，$NUXY_1$，$NUXY_2$，…，$NUXY_{ntemp}$。

MPDATA，ALPX，，1，$ALPX_1$，$ALPX_2$，…，$ALPX_{ntemp}$。

TB，BISO，，NTEMP（NTEMP 可为 2 到 6）。

TBTEMP，$temp_1$（第一个温度点）。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

TBTEMP，$temp_2$（第二个温度点）。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

（重复此形式 NTEMP 次）

TBTEMP，$temp_{ntemp}$（最后一个温度点）。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

注意，对于这些材料模型，必须提供足够范围的温度数据，使之能够覆盖分析中的实际温度。否则，分析将会终止。

横向各向异性硬化模型是仅供壳单元和二维单元使用的全迭代各向异性塑性模型。在此模型中，由 HILL 给出的屈服函数在平面应力情况下简化。

应力应变仅定义在一个温度下。用 MP 命令输入弹性模量（Exx），密度(DENS)和泊松比（NUXY）。用 TB，PLAW，，，，7 和 TBDATA 命令的 1～4 项输入屈服应力，切线模量，各向异性硬化参数以及有效屈服应力相对于有效塑性应变的载荷曲线 ID 号：

TB，PLAW，，，，7。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，3，R（各向异性硬化参数）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

TBDATA，4，LCID（屈服应力和塑性应变的载荷曲线 ID）。

横向各向异性 FLD 硬化模型用于模拟各向异性材料的板料成形。仅考虑横向各向异性材料。对于此模型，可以用定义的载荷曲线来模拟流动应力和有效塑性应变的关系（EDCURVE）。另外，也可以定义成形极限图（也可用 EDCURVE）。

这一塑性模型仅在壳单元和二维单元中使用。这一模型遵循前边所述的横向各向异性弹塑性模型所介绍的塑性理论。理论基础可参考该模型。

使用横向各向异性 FLD 模型，需用 MP 命令输入密度（DENS），弹性模量（Exx）和泊松比（NUXY）。如下所示，可以用 TB，PLAW，，，，10 和 TBDATA 命令中的 1～5 项定义其他参数。

TB，PLAW，，，，10。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

TBDATA，3，R（各向异性硬化参数）。

TBDATA，4，LCID1（有效应力和塑性应变的载荷曲线）。

TBDATA，5，LCID2（定义 FLD 的载荷曲线）。

双线性随动模型是（与应变率无关）经典的双线性随动硬化模型，用两个斜率（弹性和塑性）来表示材料的应力应变特性。用 MP 命令输入弹性模量（Exx），密度（DENS）和泊松比（NUXY）。可以用 TB ，BKIN 和 TBDATA 命令中的 1～2 项输入屈服强度和切线模量：

TB，BKIN。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

塑性随动模型是各向同性、随动硬化或各向同性和随动硬化的混合模型，与应变率相关，可考虑失效。通过在 0（仅随动硬化）和 1（仅各向同性硬化）间调整硬化参数来选择各向同性或随动硬化。应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑，用与应变率有关的因数表示屈服应力。

应力应变特性只能在一个温度条件下给定。用 MP 命令输入弹性模量（Exx），密度（DENS）和泊松比（NUXY）。用 TB ，PLAW，，，，1 和 TBDATA 命令中的 1～6 项输入屈服应力，切线斜率，硬化参数，应变率参数 C 和 P 以及失效应变：

如下所示，可以用 TB ，PLAW，，，，10 和 TBDATA 命令中的 1～5 项定义其他参数。

TB ，PLAW，，，，1。

TBDATA，1，σ_Y（屈服应力）。

TBDATA，2，E_{tan}（切线模量）。

TBDATA，3，β（硬化参数）。

TBDATA，4，C（应变率参数）。

TBDATA，5，P（应变率参数）。

TBDATA，6，ε_f（失效应变）。

参数 Barlat 模型是由 Barlat Lian 提出的各向异性塑性模型，用于平面应力条件下的铝质薄板模型。使用了指数和线性硬化法则。用 MP 命令输入弹性模量（Exx），密度（DENS）和泊松比（NUXY）。硬化准则类型 HR（线性为 1 或指数为 2），切线模量（HR=1）或屈服系数（HR=2），屈服应力（HR=1）或硬化系数（HR=2），Barlat 指数，m，厚度和宽度方向的应变比以及正交各向异性材料轴，用 TB ，PLAW，，，，3 和 TBDATA 命令的 1～10 项输入。

Barlat 各向异性塑性模型是由 Barlat，lege 和 Berm 发展的各向异性塑性模型，用于模拟成形过程的材料特性。

TB，PLAW，，，，6。

TBDATA，1，k （强度系数）。

TBDATA，2，ε_0（初始应变）。

TBDATA，3，n （硬化系数）。

TBDATA，4，m （流动指数（Barlat））。

TBDATA，5，a。

TBDATA，6，b。

TBDATA，7，c。

TBDATA，8，f。

TBDATA，9，g。

TBDATA，10，h。

应变率敏感的幂函数式塑性模型是与应变率相关的塑性模型，主要用于超塑性成形分析，该模型遵循 Ramburgh -Osgood 本构关系。

应力-应变关系只能定义于一个温度下。用 MP 命令输入弹性模量（EXX），密度（DENS）和泊松比（NUXY）。用 TB，PLAW，，，，4 和 TBDATA 命令的第 1～4 项定义材料常数、硬化系数、应变率敏感系数及初始应变率。

TB，PLAW，，，，4。

TBDATA，1，k（材料常数）。

TBDATA，2，m（硬化系数）。

TBDATA，3，n（应变率灵敏系数）。

TBDATA，4，（初始应变率）。

应变率相关各向同性塑性模型主要用于金属和塑性成形分析，在此模型中，载荷曲线用来描述初始屈服强度与有效应变率之间的函数关系。

应力-应变特性仅定义于同一温度下。用 MP 命令输入弹性模量（EXX）、密度

（DENS）和泊松比（NUXY）。定义初始屈服应力和有效应变率的载荷曲线号，切线模量，定义弹性模量和有效应变率的载荷曲线号，定义切线模量和有效应变率的载荷曲线 ID，定义 VonMisess 失效应力和有效应变率的载荷曲线号，用 TB，PLAW，，，，5 和 TBDATA 命令的第 1～5 项输入。对于壳单元，可在第 6 项中给定 MnTime，取代第 5 项中的 LCID4 定义材料失效。MnTime 为自动删除单元的最小步长。

TB，PLAW，，，，5。

TBDATA，1，LCID1(定义初始屈服应力和有效应变率的载荷曲线 ID)。

TBDATA，2，Etan(切向（塑性硬化）模量)。

TBDATA，3，LCID2(定义弹性模量和有效应变率的载荷曲线 ID)。

TBDATA，4，LCID3(定义切线模量和有效应变率的载荷曲线 ID)。

TBDATA，5，LCID4(定义 VonMisess 失效应力和有效应变率的载荷曲线 ID)。

TBDATA，6，MnTime(自动删除单元的最小步长，仅用于壳单元)。

复合材料破坏模型是由 Chang&Chang 发展的复合材料失效模型，模型采用如下 5 个参数:

- S1=轴向拉伸强度。
- S2=横向拉伸强度。
- S12=剪切强度。
- C2=横向压缩强度。
- α=非线性剪切应力参数。

所有参数均由实验确定，用 MP 命令输入弹性模量（Exx，Eyy，Ezz）、剪切模量（Gxy，Gyz，Gxz），密度（DENS）和泊松比（NUXY，NUYZ，NUXZ），压缩失效时的体积模量、剪切强度、轴向拉深强度、横向拉深强度、横向压缩强度以及非线性剪切应力参数用 TB，COMP 和 TBDATA 命令的第 1～6 项输入：

TB，COMP。

TBDATA，1，KFAIL（压缩失效时的体积模量）。

TBDATA，2，S12（剪切强度）。

TBDATA，3，S1（轴向拉伸强度）。

TBDATA，4，S2（横向拉伸强度）。

TBDATA，5，C2（横向压缩强度）。

TBDATA，6，α（非线性剪切应力参数）。

混凝土破坏模型用于分析承受混合冲击载荷的刚劲加强混凝土材料。这一模型要求混凝土和加强材料常数以及状态方程。用 MP 命令输入密度（DENS）和泊松比（NUXY）用 TB，CONCR，，，，2 命令和 TBDATA 命令的 1～78 项输入下列值：

TB，CONCR，，，，2。

TBDATA，1，（失效的最大主应力）。

TBDATA，2，（内聚常数）。

TBDATA，3，（压力硬化系数）。

TBDATA，4，（压力硬化系数）。

TBDATA，5，（屈服内聚力）。

TBDATA，6，（屈服极限的压力硬化系数）。

TBDATA，7，（屈服极限的压力硬化系数）。

TBDATA，8，（失效材料的压力硬化系数）。

TBDATA，9，（失效材料的压力硬化系数）。

TBDATA，10，（破坏比例因子）。

TBDATA，11，（单轴拉伸的破坏比例因子）。

TBDATA，12，（三轴拉伸的破坏比例因子）。

TBDATA，13，PRE（加强筋的百分比）。

TBDATA，14，（加强筋的弹性模量）。

TBDATA，15，（加强筋的泊松比）。

TBDATA，16，（初始屈服应力）。

TBDATA，17，（切线模量）。

TBDATA，18，LCP（主材料速率敏感度的载荷曲线 ID）。

TBDATA，19，LCR（加强筋速率敏感度的载荷曲线 ID）。

TBDATA，20-32，（破坏函数 1～13）。

TBDATA，33-45，（比例因子 1～13）。

TBDATA，46，GAMA（温度常数）。

TBDATA，47，（初始内部能量）。

TBDATA，48，（初始相对体积）。

TBDATA，49～58，（体积应变数据值 1～10；相对体积自然记录）。

TBDATA，59～68，（体积压力值）。

TBDATA，69～78，（温度值）。

分段线性塑性模型是多线性弹塑性材料模型，可输入与应变率相关的应力应变曲线。它是一个很常用的塑性准则，特别用于钢。采用这个材料模型，也可根据塑性应变定义失效。采用 Cowper-Symbols 模型考虑应变率的影响。

用 MP 命令输入弹性模量（Exx），密度(DENS)和泊松比(NUXY)。用 TB，PLAW，，，，8 和 TBDATA 命令的 1～7 项输入屈服应力、切线模量、失效的有效真实塑性应变、应变率参数 C、应变率参数 P、定义有效全应力相对于有效塑性真应变的载荷曲线 ID 以及定义应变率缩放的载荷曲线 ID。

TB，PLAW，，，，8。

TBDATA，1，（屈服应力）。

TBDATA，2，（切线模量）。

TBDATA，3，（失效时的有效塑性真应变）。

TBDATA，4，C（应变率参数）。

TBDATA，5，P（应变率参数）。

TBDATA，6，LCID1（定义全真应力相对于塑性真实应变的载荷曲线）。

TBDATA，7，LCID2（关于应变率缩放的载荷曲线）。

注意，如果采用载荷曲线 LCID1，则用 TBDATA 命令输入的屈服应力和切线模量将被忽略。另外，如果 C 和 P 设为 0，则略去应变率影响。如果使用 LCID2，用 TBDATA 命令输入的应变率参数 C 和 P 将被覆盖。只考虑真实应力和真实应变数据。

幂函数塑性模型用于金属和塑性成形分析的与应变率有关的塑性模型。该模型提供各向同性硬化的弹塑性行为。并且它用一个包括 Cowper-Symbols 乘子的幂函数本构关系来描述应变率的影响。

用 TB，PLAW，，，，2 和 TBDATA 命令的 1～4 项输入强度系数、硬化系数和应变率参数 C 和 P：

TB，PLAW，，，，2。

TBDATA，1，k（强度系数)。

TBDATA，2，n（硬化系数）。

TBDATA，3，C（应变率参数）。

TBDATA，4，P（应变率参数）。

弹塑性流体动力学模型用于模拟承受大应变的材料，这里塑性特性可以由一系列数据点定义或屈服应力和切线模量定义。如果指定了有效真实塑性应变和应力值，应力应变特性可以由有效真实应力与真实塑性应变曲线的数据点定义。可以最多定义 16 个数据点。如果应变值超过了最大输入值，将使用线性插值；因此，需输入其他值来覆盖分析中所有的应变值。用 MP 命令输入密度(DENS)、弹性模量（EX）和剪切模量（GXY）。用 TB，PLAW，，，，9 和 TBDATA 命令的第 1～45 项输入下列参数：

TB，PLAW，，，，9。

TBDATA，1，（初始屈服应力）。

TBDATA，2，（硬化模量）。

TBDATA，3，PC（截断压力值）。

TBDATA，4，（失效应变）。

TBDATA，5～20，（有效应变数据曲线值）。

TBDATA，21～36，（有效应力数据曲线值）。

TBDATA，37，（状态常数的线性多项式方程）。

TBDATA，38，（状态常数的线性多项式方程）。

TBDATA，39，（状态常数的线性多项式方程）。

TBDATA，40，（状态常数的线性多项式方程）。

TBDATA，41，（状态常数的线性多项式方程）。

TBDATA，42，（状态常数的线性多项式方程）。

TBDATA，43，（状态常数的线性多项式方程）。

TBDATA，44，（初始内能）。

TBDATA，45，（初始相对体积）。

用 EDMP 命令定义刚性体，例如，定义材料 2 为刚性体，执行：EDMP，RIGIS，2。用指定材料号定义的所有单元都认为是刚性体的一部分。材料号以及单元的单元类型和实常数类型号用来定义刚体的 PARTID。这些 PARTID 用于定义刚性体的载荷和约束（如第 4 章所述，Loading）。刚体内的单元不必用连接性网格连接。因此，为了在模型中表示多个独立的刚性体。必须定义多个刚体类型。但是，两个独立刚体不能共同使用一个节点。

使用 EDMP 命令的同时，必须用 MP 命令定义刚体材料类型的杨氏模量（Ex），泊松比（NUXY）和密度（DENS）。必须指定实际的材料特性值，从而使程序能计算接触表面的刚度。基于此原因，在显动态分析中，刚性体不要用不切实际的杨氏模量或密度，刚体不能再变硬因为它已是完全刚硬的。

因为刚性体的质量中心的运动传递到节点上，所以不能用 D 命令在刚体上施加约束。刚体的一个节点上的约束和初始速度将转换到物体的质心。但是，如果约束了多个节点，就很难确定使用哪种约束。要正确在刚体上施加约束，使用 EDMP 命令的平移（VAL1）和转动（VAL2）约束参数域，表示如下：

VAL1-平移约束参数（相对于整体笛卡儿坐标系）。

0 没有约束（默认）。

1 约束 X 方向的位移。

2 约束 Y 方向的位移。

3 约束 Z 方向的位移。

4 约束 X 和 Y 方向的位移。

5 约束 Y 和 Z 方向的位移。

6 约束 Z 和 X 方向的位移。

7 约束 X，Y，Z 方向的位移。

VAL2-转动约束参数（相对于整体笛卡儿坐标系）。

0 没有约束（默认）。

1 约束 X 方向的旋转。

2 约束 Y 方向的旋转。

3 约束 Z 方向的旋转。

4 约束 X，Y 方向的旋转。

5 约束 Y 和 Z 方向的旋转。

6 约束 Z 和 X 方向的旋转。

7 约束 X，Y 和 Z 方向的旋转。

例如，命令 EDMP，IGID，2，7，7 将约束材料的刚体单元的所有自由度。

11.1.8 显式动态分析中的刚体

在定义刚体之后，可以用 EDIPART 命令指定惯性特性、质量和初始速度矢量。如果没有定义刚性体的惯性特性，程序将会依据有限元模型计算它们。

用刚性体定义有限元模型中的刚性部分可以大大减少显式分析的计算时间。这是由于定义一个刚性体后，刚性体内所有节点的自由度都耦合到刚性体的质心上。因此，不论定义了多少节点，刚性体仅有 6 个自由度。默认设置时，每个刚性体的质量、质心和惯性都由刚性体体积和单元的密度计算得到。作用在刚性体上的力和力矩由每个时间步的节点力和力矩合成，然后计算刚性体的运动，位移就会转换到节点上。

ANSYS/LS-DYNA 中，将分析中保持刚性特性的刚性体定义为一种材料模型。

另外，可以用 EDCRB 命令把两个刚体结合在一起，它们的作用如同一个刚性体。但与刚性体的定义不同的是，它主要依据材料号，根据 PART I D 定义的刚体约束和一个约束方

程号。因此，为了在两个物体间施加刚体约束，必须执行命令 EDCRB，ADD，NEQN，PARTS，NEQN 为约束方程参考编号，PARTM 是主刚体 part 号，PARTS 是从刚体 part 号。必须注意不能用同一个 NEQN 值执行多个 EDCRB 命令，仅使用最后一个 NEQN 值。当使用 EDCRB 命令时，第二个刚性体将被第一个刚性体吸收，因而此后对第二个刚性体的任何操作将无效。

默认时，程序将计算每个刚体的惯性特性。但是，用户可能会发现给刚性体设定重力、质量、初始速度（在整体或局部坐标系）的特定中心和特定惯性张量是很有用的，而不是依赖于求解过程中由有限元模型计算得到的值。可以用 EDIPART 来定义刚性体的任意特征，命令格式如下：

其中：PART——定义惯性的 partID。

Option——要执行的选项。

Cvect——包括部件质心坐标系的矢量。

TM——平移质量。

IRCS——惯性张量参考坐标系的标志。

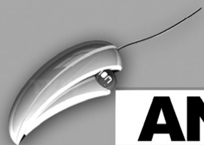
Ivect——包括惯性张量分量的矢量。

Vvect——包括刚体初始速度的矢量。

CID——局部坐标系 ID。

如果采用 ANSYS/LS-DYMAGUI 路径，可以采用下列路径 MainMenu>Preprocessor>LS-DYNAOptions>InertiaOptions>DefineInertia。输入上述所有参数，包括所需的矩阵参数。对于批处理输入，在执行 EDIPART 命令前需定义数组（DIM）并输入数据参数。下例说明了怎样定义部件 2 的惯性特性，此为一个刚性体。

```
!定义参数输入
tm=0.6300E-03 平移质量
ircs=0 坐标系标志
cid=0 坐标系ＩＤ
!
/prep7
!
!生成包含部件号为 2 的含有多个部件的刚体模型
edmp，rigid 定义刚性体
edpart，create 生成 part 列表
!定义所需矩阵
*dim，coord2，，3
*dim，velo2，，6
*dim，inert2，，6
!
!给矩阵赋值
coord2(1)=0.2450E+01，0.5000E+00，0.5000E+00
velo2(1)=0，10.0E-7，0
inert2(1)=0.3150E-03，0，0，0.2851E-03，0，0.2851E-03
!
EDIPART，2，ADD，coord2，tm，ircs，inert2，velo2，cid
!
```



可用 EDLOAD 命令对刚性体施加位移和速度载荷。注意，位移和速度是施加在 PART 号上而并不是在节点 Component 上。一个典型的命令如下：

EDLOAD，ADD，RBUX，，2，PAR1，PAR2。

该命令就是对刚体 PART2 定义 UX 位移，PART 号定义在 EDLOAD 命令的 Cname 项内（注意，对于其他类型的加载，该项为 Component 名。而对刚性体而言，该项为 PART 号而非 Component 名）。该 PART 号必须与 EDMP 命令定义的刚性体相对应。

在一些动力学应用中，如果模型中大部分单元都是可变形的，那么，持续时间较长的刚体运动的计算量就会极为庞大。摩托车轮子就是这样一个例子，轮子翻滚持续较长时间相对于后来的撞击会占用更多的 CPU。为了提高这种应用的计算效率，ANSYS/LS-DYNA 提供了这样一种转换性能，它把某些材料从变形状态换至刚性状态，然后转到变形状态，通过刚体运动过程中转换变形体为刚性体，可以节省大量的 CPU 时间。

变形体/刚性体转换本质上和重启动操作联系在一起，用户需要停止分析，定义部件转换，然后再重新启动分析。虽然在开始分析时不用部件转换，但必须在新分析中设定一个标志。使 LS-DYNA 了解模型中所有材料在计算中都有可能变为刚体。在开始分析时执行 EDRD 或 EDRI 命令设定这一标志。

注意，用 EDMP，RIGID 定义的刚体永远都是刚体，不能转换成变形体。

要转换变形体为刚性体部件，执行下列命令：

EDRD，D2R，PART，MRB。

这里，PART 是部件号，MRB 为主刚体，转换部件要融合在其中（在 GUI 中，执行 MainMenu>Solution>Rigid-Deformable>Switch）。如果不想此部件和另一个刚体融合，仅留 MRB 为空白即可。

一旦使用上述命令把变形体转换为刚体后，可以接着执行 EDRD，R2D，PART 可以再转换回来。

在新分析中，如果没有变形体转换成刚体，但转换在重启动中可以定义，执行 EDRD，D2R（在 GUI 中，采用 MainMenu>Solution>Rigid-Deformable>Switch）。然后选择“Initialize”）。

转换变形体为刚体时，可以用 EDRI 命令定义刚体的惯性特性（MainMenu> Solution> Rigid-Deformable>InertiaProperties）。如果不定义惯性特性，它们将由程序计算。

在变形体转换为刚体后，变形体上定义的一些约束变为无效。为了避免计算的不稳定，需用 EDRC 命令（Main Menu>Solution>Rigid-Deformable>Controls）来改变这些约束的状态。

为了使刚体转换能正常工作，单元算法的选择是很关键的。在现行 LS-DYNA 中，Hughes-Liu 壳和梁单元不能用于部件转换。因为其应用的是应变和应力更新算法。不能使用的单元算法有：SHELL163 的 KEYOPT(1)=1，6，7，11，BEAM161 的 KEYOPT(1)=0 和 1。

对于 SOLID164 单元要特别注意的是：当刚体转换为变形体时，单元应力为零以去除虚拟特性。

与用 EDMP 命令定义的典型刚体不同，节点刚体和部件号无关。用 EDCNSTR，ADD，NRB，COMP1 定义节点刚体。这里 COMP1 是节点组元。节点刚体主要用于模拟刚

性（焊接）接点，在该点不同的柔性组元（有不同的 MATIDS）作为一个刚体一起运动，因为节点刚体和部件号无关，所以前面讨论的刚体的其他选项（如 EDLOAD 命令施加载荷）不能用于节点刚体。

11.1.9 显式动态分析后处理

可以用 ANSYS 的两种后处理 POST1 和 POST26 查看 ANSYS/LS-DYNA 结果。用 POST1 查看整个模型在特定时刻点的结果或动画结果。用 POST26 查看一段时间内指定 component 在很多时间点的结果。显式动态分析中所需查看的一般是动画结果（POST1）和时间历程结果（POST26）。有经验的 LS-DYNA 用户也可以用 LSTC 后处理器 LS-POST。但是 ANSYS 不支持这种处理器。

后处理中所使用的结果取决于用 EDRST 和 EDHTIME 命令写入到 Jobname.RST 和 Jobname.HIS 文件的信息（MainMenu>Solution>OutputControls>FileOutputFreq）。

注意 Jobname.RST 和 Jobname.HIS 的区别：Jobname.RST 文件主要用于 POST1 后处理，包括整个模型的求解，但是捕捉的时间点相对较少。一般来说，Jobname.RST 文件包含有足够的信息以形成动画；相对来说，在 POST26 中使用的 Jobname.HIS 文件包括较多的时间点上的结果，但它仅限于模型的一部分（要得到整个模型在较多时刻的结果将很快充满硬盘空间）。相比较而言，Jobname.RST 文件中的时间步通常小于 100，Jobname.HIS 文件通常是大于 1000 或更多。

ANSYS/LS-DYNA 不支持文件分离。因此，存储在任何文件中的全部数据仅限于系统所允许的最大文件大小。对于大模型，存储在结果文件 Jobname.RST 和 Jobname.HIS 中的数据可能超过系统的限制。在这种情况下，ANSYS/LS-DYNA 将把数据写入每一个结果文件中直到限制的大小。剩余的数据将不再写入，而存储的最后一个载荷步数据可能是不完全的。而且，如果试图用 SET 命令获得最后一次存储的载荷步数据，系统就会产生错误。为了防止结果文件超出系统限制，应该减少写入到 Jobname.RST 和 Jobname.HIS 的输出量。

在用 POST26 观看结果前，必须在模型中生成单元或节点 Components。例如，在 PREP7 或 SOLUTION 阶段，选择想观看结果的那部分单元，生成仅含有那些单元节点的 Component，也可以生成包含一组给定节点的 Component。这些 Components 可通过 GUI 生成，或执行下列命令：

```
ESEL，S，MAT，，1            !选择材料 1 的单元。
CM，elm1，elem               !生成单元组件 elm1。
NSLE                         !选择单元的节点。
CM，nod1，node               !生成节点组件 nod1。
```

应限制单元和节点组件以节省硬盘空间。

在用 POST26 查看结果前，必须直接命令 ANSYS/LS-DYNA 把相关的信息写入到 Jobname.HIS 或其他输出文件中，在 PREP7 或 SOLUTION 阶段，需定义时间步数、要分析的单元和节点 Component 以及记录的 ASCII 码文件。可用 GUI 给定上述信息（MainMenu>Solution>OutputControls）或执行下列命令：

```
EDHTIME，NSTEPS              !定义时间历程结果的时步数。
EDHIST，elm1                 !定义单元 component 名。
```

```
EDHIST，nod1                 !定义节点 component 名。
EDOUT，GLSTAT                !写 ASCII 文件 GLSTAT（总的时间步和能量统计）。
EDOUT，MATSUM                !写 ASCII 文件 MATSUM（每个 PART 的能量信息）。
EDOUT，SPCFORC               !写 ASCII 文件 SPCFORC（单点约束（反作用）力）。
EDOUT，RCFORC                !写 ASCII 文件 RCFORC（合成界面力数据）。
EDOUT，SLEOUT                !写 ASCII 文件 SLEOUT（界面滑移能量）。
EDOUT，NODOUT                !写 ASCII 文件 NODOUT（节点数据）。
EDOUT，RBDOUT                !写 ASCII 文件 RBDOUT（刚性体数据）。
```

如果熟悉 LS-DYNA 程序所产生的所有 ASCII 文件，可用 EDOUT，ALL 命令写出所有可能的 ASCII 文件。

ANSYS 程序的 POST1 操作同样适用于 ANSYS/LS-DYNA 程序，可显示变形形状、等值线、矢量以及结果表格。

当采用 POST1 时，可用 RSYS 命令把应力结果转换到定义的坐标系中。在打印输出、显示或单元列表操作时，就会轮换应力数据。除 BEAM161，COMBI165 和合成单元 SHELL163（KEYOPT（3）=1）外，RSYS 支持所有显式单元的应力输出。在包括这些单元的模型中使用 RSYS 命令，执行此命令之前，千万不能选择不支持的单元。

注意：任何显式单元的应变数据都不能转换。如果 RSYS 不设置为整体笛卡儿坐标系，而需要应变结果，将忽略打印或绘图命令。

当在 POST1 中显示结果时，将自动去除失效单元。失效单元是那些超过指定失效准则的单元（如失效应变）。在某些情况下，由于模型中某时间步一定数量单元失效，网格连接可能会出现丢失现象。但是，单元仍在所选之列，模型仍按所期望的那样工作。（在 LS-DYNA 求解中，单元失效后自动从求解中去除）。

在 POST1 中也可进行动画显示。例如，可以动画显示变形形状的单元中心应力。从 Jobname.RST 文件读入一系列结果后，采用 Utility Menu>Plotctrls>Animate>Over Results。然后使用动画对话框中的“push-button”来运行、停止、重新运行以及控制动画显示。

如果使用命令输入，使用合适的绘图命令（如 PLESOL）然后再运行 ANDATA 如下命令。

```
PLESOL，Item，Comp
ANDATA
```

这种方法就是读入所有的结果数据，并进行动画显示。对于快速作图，使用 INRES 命令选择结果数据中的特定类型：INRES，Item。

POST1 中所使用的结果数据因单元不同而不同。每一种显式动态单元（LINK160，BEAM161，SHELL163，SOLID164，COMBI165，MASS166，LINK167）的输出数据，都在《ANSYS Elements Reference》帮助文档中有完整的描述。

以下是有关显式动态单元中应注意的几项：

对于 SOLID164 单元，不论使用 1 个或 8 个积分点（KEYOPT(1)），应力应变结果只储存单元中心的。

对于 BEAM161 和 SHELL163 单元，不论使用缩减还是多个积分点，储存应力应变结果仅在每个单元的中心（壳单元的每一层）。

对于 BEAM161 和 SHELL163 单元，必需给定 ANSYS/LS-DYNA 计算的积分点数（采

用实常数）和存储结果数据的积分点数（采用 EDINT 命令）。默认值时，壳单元高斯积分点数为 2；对于高斯积分法，可定义到 5 个点（层壳）。超过 5 层，需要用梯形积分法则或用户自定义积分法（注意，对于少于 20 个积分点的情况尤其是弯曲，不推荐使用梯形积分法）。默认时，对于壳单元，用 EDINT ，SHELLIP 定义的层数为 3。如果 NIP=2，底层的结果和积分点 1 相对应，顶层的结果和积分点 2 相对应，中间的结果为顶层和底层的平均值。对于梁单元，默认时存储 4 个积分点的结果（在 EDINT 中，BEAMIP=4）。对于作为结果输出的梁单元的描述，（KEYOPT（1）=2），不管有没有 BEAMIP 设置，都没有应力输出。如果 BEAMIP=0，对于任何梁单元都没有应力输出。在这种情况下，梁单元将不出现在任何 POST1 的图中，因为程序假设它们为失效单元。

当使用 BEAM161 单元时，可用 LAYER ，NUM 命令定义想要保存结果的层数，对于应力数据，层数由最低层开始逐层向上定义。然而，对于应变数据，层 1 是低层，层 2 是顶层，无论存在多少层，应变信息只存储这两层。另外，仅可得到在层中间的数据，而不能得到每层或单元的顶表面或底表面的数据。要得到靠近单元表面的结果，应沿壳单元厚度给定较多的积分点。然而，存储这么多层数据量将变得很庞大。

SHELL，LOC 命令不影响 SHELL163 单元。默认时，在绘制数据（PLNSOL，PLESOL）时只显示顶层输出数据，但在打印结果中将显示最顶层和最低层数据。

对于 PLANE162，SHELL163，SOLID164 单元，“TOTAL”应变仅是记录的应变（不管单元采用的材料性质，包括弹性材料）。当查看这些单元的塑性应变时（PLESOL，EPPL），也可以显示塑性应变以外的应变。

在 ANSYS/LS-DYNA 的大变形分析中，用自适应网格来定义壳单元的网格细分。在分析中包括自适应网格时，随着网格增多与用户定义的单元面比保持一致，模型中单元的数目在求解中也会增多。随着单元数的变化，文件扩展名也会改变来表示一个新的有限元网格。

结果文件扩展名表示如下：

Jobname.RS01——第一次网格划分。

Jobname.RS02——第二次网格划分。

Jobname.RS03——第三次网格划分。

为了在采用自适应网格时处理结果，需定义合适的文件名和扩展名（FILE 命令）来区分特定的时间步。不能恢复原来的模型数据库（.DBfile），因为数据库文件中的网格不能和结果文件中的匹配。下面的例子说明了一个典型的后处理过程：

```
/POST1
FILE，Jobname，RS01      !指定第一次网格重分的结果文件。
SET，LIST                !显示第一次网格重分要写入的时间步。
SET，1，2                !把结果放在一个特定的时间步内。
PRNSOL，…                !打印或显示结果。
```

在 RSnn 文件中不存储单元特性。因此，在用这些文件进行后处理时，应小心使用选择逻辑。并且，不能仅用这些文件的信息进行求解，也不能由这些文件存储新的数据库。

由于是多结果文件，当采用自适应网格时不能直接显示整个求解过程的动画。但是，采用 FILE 或/SEG 命令可以写一个宏来创建所要的动画。

在 ANSYS 中可用的 POST26 操作也可在 ANSYS/LS-DYNA 中使用。用 POST26 可得到

两种类型的结果：节点和单元求解。

混合的输出文件，例如，存储在 ASCII 文件（GLSTAT，RCFORC，SLEOUT，MATSUM，SPCFORC，NODOUT 和 RBDOUT）中的各种能量、功和反作用力等。

注意：当使用 POST26 查看结果时，必须用 Jobname.HIS 文件存储足够的时间历程数据结果，用 FILE 命令将 Jobname.HIS 文件读入到 POST26 后处理器中（MainMenu>TimeHist Postpro>Settings>File）:

FILE，Jobname.HIS。

如果不将 Jobname.HIS 文件读入到 POST26，结果数据从 Jobname.HIS 文件读入，而它不能为时间历程后处理器提供足够的信息。

POST26 处理与时间有关的结果，统称为变量表。每一变量都有一参考号，变量号 1 给时间预留。要输出结果，就必须通过 GUI 界面定义、画出或列表显示变量（MainMenu>TimeHistPostpro）或使用以下命令。

NSOL——从结果文件定义被存储的节点数据。

ESOL——从结果文件定义被存储的单元数据。

PLVAR——以图形格式显示数据。

PRVAR——列表显示变量-时间曲线。

单元和节点解的结果可以从 Jobname.HIS 和 Jobname.RST 中得到。必须注意，从.HIS 文件读的数据仅是 EDHIST，NCOMP 给定的 Component 中包括的节点和单元。

为了对 BEAM161 和 SHELL163 单元中不同积分点的结果进行存储和显示，应对每一层使用 LAYERP26（MainMenu>TimeHistPostpro>DefineVariable）和 STORE 命令（Main Menu>Time Hist Postpro>Store Data）对于 SHELL163 的实例如下。

```
LAYER26，num1          !定义第一层号
ESOL                   !存储第一层单元数据
NSOL                   !存储第一层节点数据
STORE，MERGE           !存储第一层结果数据
LAYERP26，num2         !定义下一层号
ESOL                   !存储下一层单元数据
NSOL                   !存储下一层节点数据
STORE，MERGE           !存储第一层结果数据（还有第一层结果数据）
LAYERP26，numn         !定义下 n 层号
ESOL                   !存储下 n 层单元数据
NSOL                   !存储下 n 层节点数据
STORE，MERGE           !存储下 n 层结果数据
PRVAR                  !图示所有层的结果数据
```

对于每一层都必须使用 STORE，MERGE 命令，否则只能得到最后一层的数据。

查看写入 GLSTAT，MATSUM，SPCFORC，RCFORC，SLEOUT，NODOUT 和 RBDOUT 文件的信息，应首先执行 FILE，Jobname.HIS（MainMenu>TimeHistPostpro>Settings>File）来获得时间信息，然后执行 EDREAD 命令（MainMenu>TimeHistPostpro>ReadLSDYNAData）。在 EDREAD 之后，须执行 STORE（MainMenu>TimeHistPostpro>StoreData）命令把这些数据存储成时间历程变量存储后，就可以用标准的 POST26 程序分

析数据。

如果所用数据中存在噪声数据（如地震激励），可以把它们平滑处理成较少的数据，从而获得比较精确的近似数据点。

处理数据要求 4 个数组。前两个包括独立和非独立变量的噪声数据；后两个包括处理的数据（在处理后）。处理数据之前，需定义前两个矢量然后填上噪声数据，如果采用交互模式，ANSYS 将自动创建第三个和第四个矢量，但如果采用批处理模式，在处理数据前也须创建这些矢量（ANSYS 将填充处理后的数据）。

创建这些数组后，就可以用 EDNDTSD 命令（Main Menu>TimeHistPostpro>Smooth Data）处理这些数据。也可以用 DATAP 域处理全部或部分积分点，也可以在 FITPT 域选择一个合适的阶数。DATAP 域默认为所有点，而 FITPT 域默认为数据点的一半。为了显示这些结果，可以选择显示未处理的、处理后的数据或两者都显示。

11.1.10 跌落测试模块

Drop Test Module（DTM）是 ANSYS/LS-DYNA 的一个可选的附加模块。DTM 大大简化了模拟跌落测试的步骤。跌落测试包括用假定的重力场给物体定向，并且允许其在重力作用下下落一定的高度后到达刚性表面（目标面）。在典型的跌落测试中，物体从某处跌落，目标面位于与重力加速度 g 垂直的表面上。

DTM 提供了一个最新的 GUI，可指导进行跌落测试分析，使快速相对于目标面定义模型，定义求解控制，然后执行显式动态测试。跌落模拟分析可在用户定义时间间隔内预测物体的变形和应力，描述物体与目标冲击过程的物理特性。

DTM 用于 ANSYS 图形用户界面与环境（GUI），用 ANSYS 用户界面设计语言（UIDL）和工具命令语言和工具箱（Tcl/Tk）等相关 GUI 界面工具进行跌落分析。

DTM 专门设计用于 ANSYS 的 GUI 环境中，因而即使不熟悉显式动态分析的用户也很容易进行跌落模拟分析。可以发现使用 DTM 有许多优点：例如，可自动生成目标面，也可以自动定义初始平移速度和角速度、接触表面摩擦系数以及与 g 不垂直的目标方向。对于大部分跌落测试来说，可以在冲击前一刻开始分析，以减少计算时间。当使用这一选项时，DTM 将自动计算物体的平移速度并且在分析开始时应用它，所有的跌落测试实例忽略作用在物体上的空气阻力。

典型的跌落测试包括在重力场某高度抛落物体到平面或刚性面（目标面）上，并忽略表面摩擦。这里叙述的基本步骤假设物体初速度为零，并且物体跌落到平面目标上，目标面的法线方向与重力加速度方向垂直。例如，包括表面摩擦的影响，非零初速度（线速度或角速度）的设定，目标尺寸、特性和方向的修改。

在开始之前，重要的是了解在 DTM 内使用什么样的屏幕坐标系。在 DTM 中，常常定义屏幕坐标系，所以 Y 轴（竖直）与 g 方向相反。这样就可以很方便地用屏幕坐标系跟踪跌落物体和重力场的关系轨迹。

在进入 DTM 之前，必须建立或导入跌落物体的模型，应该定义所有材料特性，包括阻尼。模型中应包括与 LS-DYNA 兼容的单元。要保证材料的密度或弹性模量不为零，否则不能使用 DTM。

为避免时间增量退化问题，建模时遵循下列原则。

- 避免三角、梯形和棱柱单元。
- 避免小单元。
- 避免尖角单元。
- 尽可能用均匀网格。

推荐施加一定的阻尼，从而减少振荡响应，也可以用 EDDAMP 命令施加 alpha（质量阻尼）和 beta（刚度阻尼）。建模完成进入 DTM 前，用一个唯一的名称保存当前数据库（Utility Menu> File> Save As）。

采用 Main Menu>Drop Test>Set Up 在 DTM 中设定分析。出现包括几个标签的 Drop Test Set-up 对话框。大部分普通跌落测试参数在 Basic 选项卡中，偶尔需要修改的参数都包含在其他选项卡中。每个选项卡中的描述及功能如下。

Basic 选项卡：定义重力加速度的大小，物体跌落高度，物体定向，分析开始时间，撞击后的运行时间，以及输出结果文件和时间历程文件的频率。

- Velocity 选项卡：修改物体的初始线/角速度。
- Target 选项卡：修改目标面的尺寸和材料特性，目标旋转，定义目标的接触和摩擦特性。
- Status 选项卡：显示重力加速度，初始平移/角速度以及求解。

当 Drop Test Set-up 对话框出现时，单击 OK 按钮或 Cancel 按钮后才可以选择其他菜单。

- 查看所有表内的信息。
- 单击 Status 表，显示大部分更新的输入数据。
- 在 ANSYS 图形窗口中查看物体和目标。

如果选择 Status 表，ANSYS 会尝试自动生成目标面（除非已经通过 Target 表创建了目标），并以黑字体在 Status 表末尾显示信息，表示可接受设置的所有数据，并且可以求解分析。而黄色字体表明用户应该小心，因为数据产生错误。或者红色线框，表明这些数据不能接受。

如果收到第 2 个或第 3 个错误信息，那么可在 ANSYS 输出的窗口检查它们。如果需要修改可以单击 OK 按钮。此时所有的标准 ansys 菜单不能再使用。然后选择 MainMenu>DropTest>Solve 开始 LS-DYNA 求解。ANSYS/LS-DYNADTM 当前版本存储的数据和和以前的不兼容。

求解完成后，可以采用 MainMenu>DropTest>AnimateResults 命令来显示分析持续时间内跌落物体的动画结果（如 VonMises 应变）。对于动画结果，推荐用户在跌落时刻开始分析。

除了显示动画结果外，采用 MainMenu>DropTest>TimeHistory 路径可以在指定点查看结果，它为时间的函数。当第一次进入 DTM 时，固定的屏幕笛卡儿坐标系自动定义，并在 ANSYS 图形窗口的左下角表示出来。用屏幕坐标系可以很方便地跟踪持续下落物体和引力场的关系轨迹，关于屏幕坐标系有两点需要了解：

- 在 DTM 中，屏幕坐标系的 Y 轴总是与重力加速度 g 的方向相反。
- 物体坐标可以随屏幕坐标旋转。

屏幕坐标总要定义，以便 Y 轴在屏幕 up 方向，物体坐标系是有限元模型定义的坐标系统。可以用 DTM 旋转工具重新定义物体坐标系。拾取物体上的两个节点可以定义与屏幕 Y 坐标平行的矢量。通过重新定义物体 Y 向，可以定义物体和引力间的关系，因为常常假设 Y

方向在“up”或与重力加速度的方向相反。

屏幕坐标也可以确定跌落测试的默认观察方向，定义如下：

- 屏幕 X 方向是“右”。
- 屏幕 Y 方向是“上”。
- 屏幕 Z 方向是从屏幕到观察者的方向，或“out”。

在初始化中，生成与过滤 DTM 中菜单拾取相关的关键词。关键词是 DTFILT，应避免把它作为关键词或参数名字，因为它可能干涉菜单选项的过滤。

在 DTM 内，自动生成包含物体内所有节点的分量，并且命名为_dtdrPOb，这一分量名称用于执行 LS-DYNA 的相关命令，应避免使用这个名字。

参数_dtcgnum 和_dtlownum 用于时间历程处理器的绘图和显示。

DTM 假设在跌落物体上没有约束，但是允许物体内分量间的耦合。

DTM 内使用的一些参数名是以下画线字符开头的，所以就避免使用以下画线字符开头的参数名称。

如果不给物体定义方向，默认假设是当前屏幕的 Y 轴方向和重力加速度方向相反。

在进入求解阶段前，可多次修改任意输入的参数。DTM 中所有参数都可以重新定义。可以发现，当影响初始目标/物体方向的输入参数改变时，只要单击 Target 表或 Status 表，目标面自动更新生成来反映这一变化。

定义跌落高度后，通过默认值可以注意到目标面几乎和物体接触，这是由于默认选项，在撞击时刻附近开始分析。物体和物体之间仅有一点距离就生成目标面。可能想调整 Solution time 选项在跌落时刻开始分析之后，将会发现重新定义的目标面与指定的跌落高度在同样的位置。但是，当该选项提供跌落过程的完全动画显示时，将需要更多的 CPU 时间。

用这一选项在撞击时刻附近开始分析，必须设定初始角速度为 0。DTM 不改变物体的模型，指定新的物体方向后，DTM 生成新的目标模型。

11.2 锤击法施工分析实例

ANSYS 显式动态分析可以很好地用于非线性模型、大变形问题，特别对于岩土工程问题有良好的适应能力。

11.2.1 问题背景

桩基础是一种承载能力高、稳定性好、沉降及差异变形小、地基沉降稳定快、抗震能力强及能适应各种复杂地质条件的基础形式，在当前得到广泛应用。

在各种沉桩方法中，锤击法是最为常用的一种。锤击法的施工原理是利用桩锤的冲击克服土壤对桩的阻力，使桩端沉至预定设计深度或达到地基持力层。本例将对锤击过程中桩锤冲击之后的动力过程及桩的动态应力场分布进行分析。

11.2.2 分析过程

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。设置参数、工作目录、工作名称，勾选右上角 LS-DYNA 选项，单击

Run 按钮进入 ANSYS 15.0 GUI 界面。

2）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Prepreferences，弹出图 11-6 所示的 Preferences for GUI Filtering 对话框，勾选 LS-DYNA Explict，单击 OK 按钮完成分析环境设置。

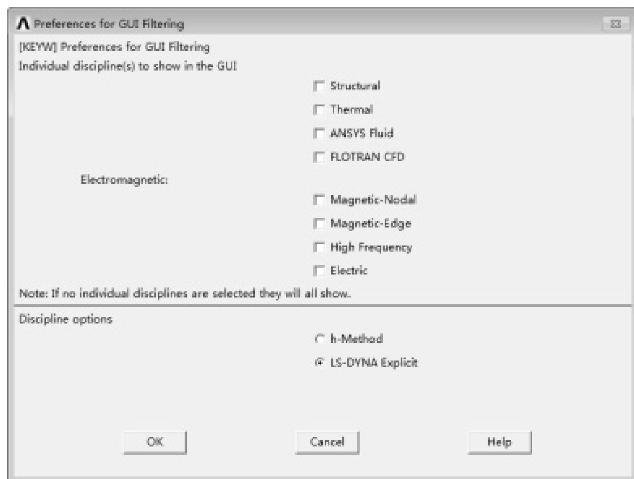


图 11-6　Preferences for GUI Filtering 对话框

3）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 命令，弹出图 11-7 所示的 Element Types 对话框，单击 Add 按钮，弹出图 11-8 所示的 Library of Element Types 对话框，选择单元类型为 3D Solid 164，单击 OK 按钮完成。



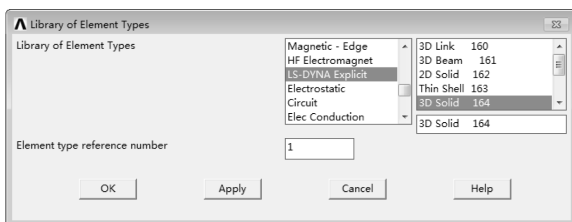


图 11-7　Element Types 对话框　　　　图 11-8　Library of Element Types 对话框

4）在 GUI 界面选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，弹出图 11-9 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为 LS-DYNA 模型，弹出图 11-10 所示的材料 1 参数设置对话框，输入 EX=2.7E10、NUXY=0.2、DENS=2500，单击 OK 按钮完成。

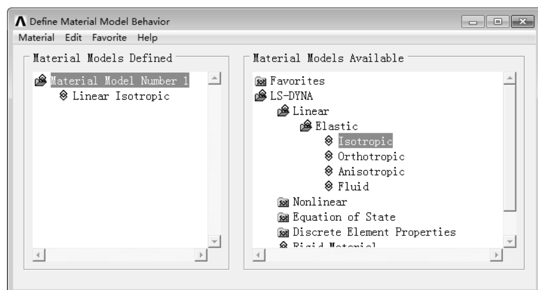


图 11-9 Define Material Model Behavior 对话框

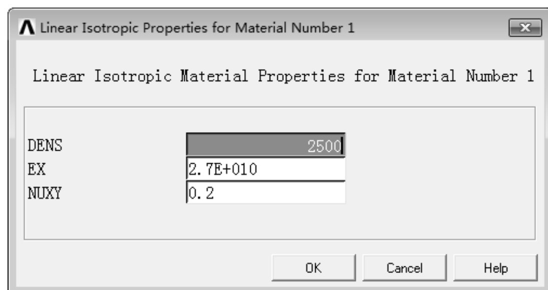


图 11-10 材料 1 参数设置

5）选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions 命令，弹出图 11-11 所示的 Create Block by Dimensions 对话框，输入几何参数如图 11-11 所示，单击 OK 按钮。

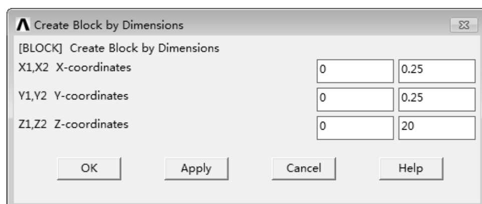


图 11-11 Create Block by Dimensions 对话框

生成图 11-12 所示的桩体几何模型。旋转模型即可以看到完整的桩体，如图 11-13 所示。

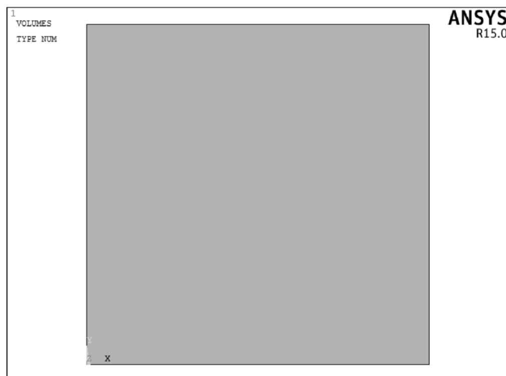


图 11-12 生成模型

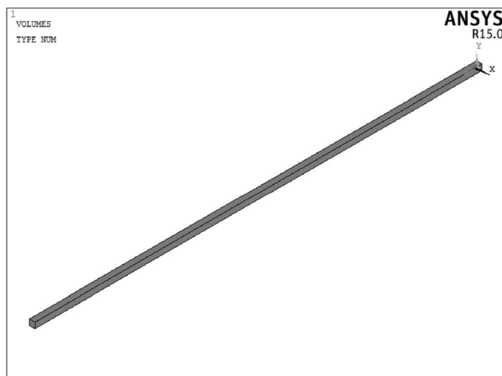


图 11-13 完整模型

6）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>All Volumes 命令，弹出图 11-14 所示的 Volume Attributes 对话框，设置如图 11-14 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size 命令，弹出图 11-15 所示的 Global Element Sizes 对话框，设置单元边长为 0.05，单击 OK 按钮完成。

在 GUI 中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Mapped>4 to 6 sided 命令，单击 Pick All 按钮，完成划分如图 11-16 和图 11-17 所示。

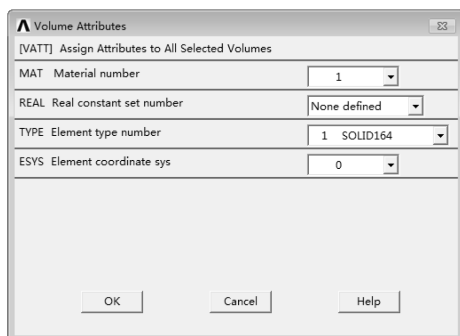


图 11-14　Volume Attributes 对话框

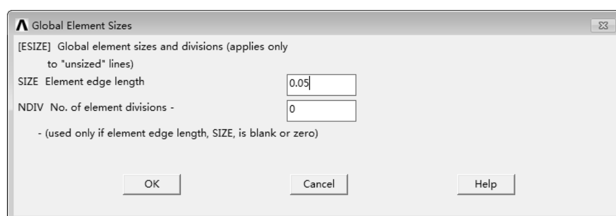


图 11-15　Global Element Sizes 对话框

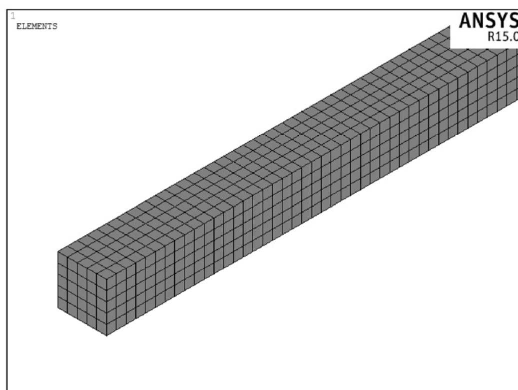


图 11-16　单元细节

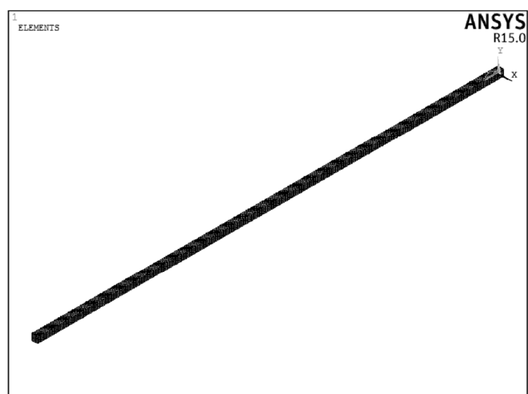


图 11-17　单元

7）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，选择 Z=-0.01 和 Z=0.01 之间的节点，如图 11-18 所示。

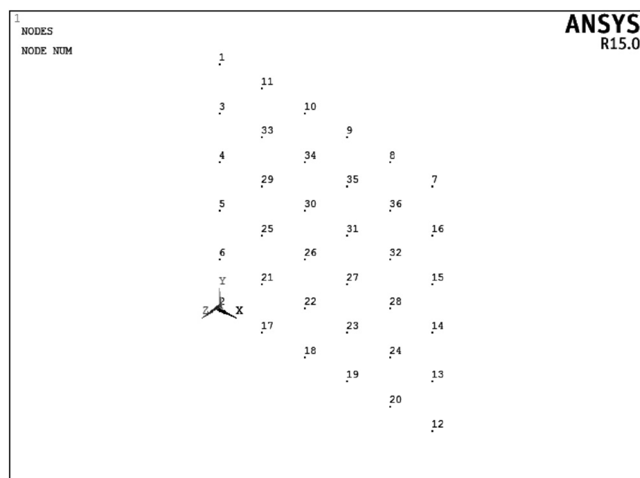


图 11-18　选出的节点

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Constraints>Apply>On Nodes 命令或 Main Menu>Solution>Constraints>Apply>On Nodes 命令，单击 Pick All 按钮，弹出图 11-19 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。选择要约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮。完成约束如图 11-20 所示。

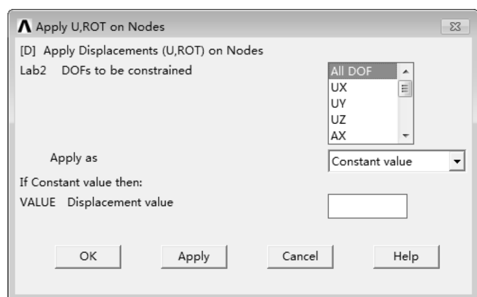


图 11-19 Apply U，ROT on Nodes 对话框

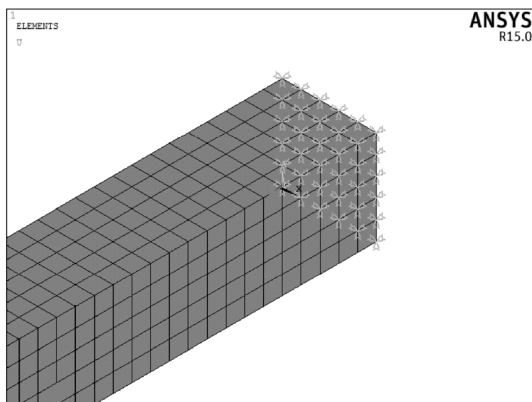


图 11-20 定义约束

8）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Parameters>Array Parameters>Define/Edit，弹出图 11-21 所示的 Array Parameters 对话框，单击 Add 按钮，弹出图 11-22 所示的 Array Parameter TIME 对话框，定义如图 11-22 所示的数组。

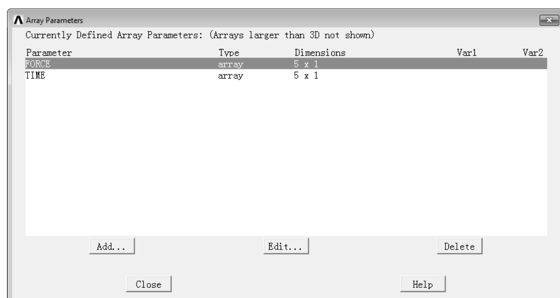


图 11-21 Array Parameters 对话框

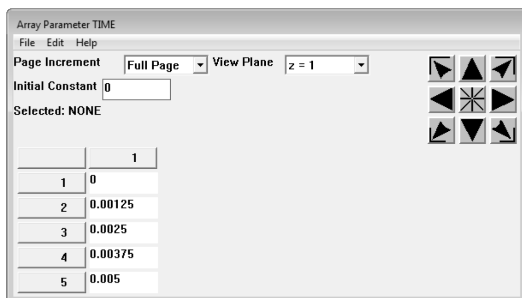


图 11-22 Array Parameter TIME 对话框（一）

重复上述操作，请读者自己动手定义如图 11-23 所示的数组 FORCE。

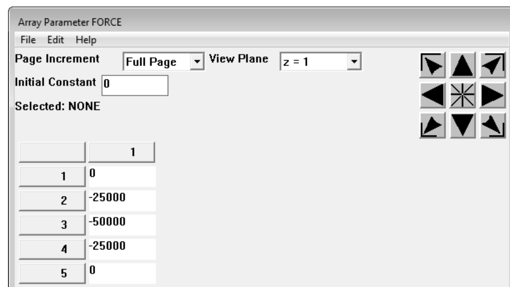


图 11-23 Array Parameter TIME 对话框（二）

9）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，使用 Select Entities 对话框选出 Z=19.99 和 Z=20.01 之间的节点。选出的节点如图 11-24 所示。

再将 Select Entities 对话框切换至选择单元，选择方式为 Attached to，选出与上一步选出节点相关的单元，如图 11-25 所示。

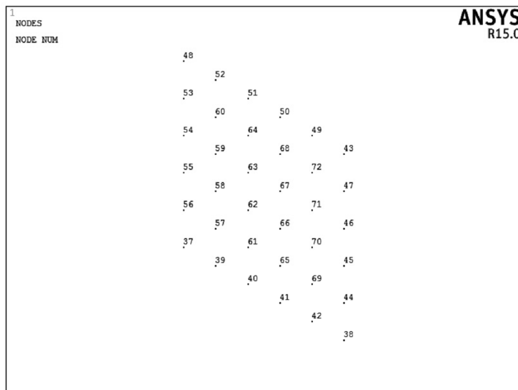


图 11-24　选出节点

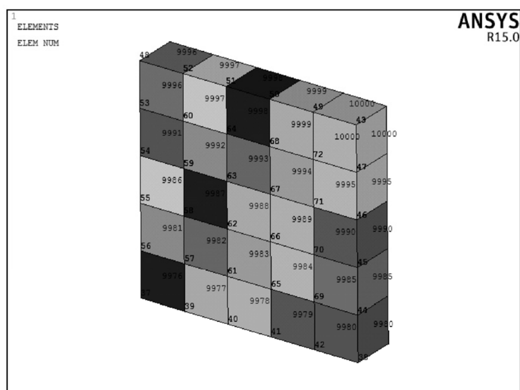


图 11-25　选出的单元

10）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Comp/Assembly>Create Component 命令，弹出图 11-26 所示的 Create Componet 对话框，输入元件名称 LOAD，选要组合的对象为 Elements，单击 OK 按钮。

Create Component
[CM] Create Component
Cname Component name　LOAD
Entity Component is made of　Elements
OK　Apply　Cancel　Help

图 11-26　Create Componet 对话框

11）在 GUI 界面中选择如下两个命令之一。

- Main Menu>Preprocessor>LS-DYNA Options>Loading Options>Specify Loads 命令。
- Main Menu>Solution>Loading Options>Specify Loads 命令。

弹出图 11-27 所示的 Specify Loads for LS-DYNA Explict 对话框，请对照图 11-27 仔细设置。

施加的载荷为压力，加载对象为 LOAD，时间数组为 TIME，载荷数组为 FORCE。

完成定义的显式动态荷载如图 11-28 所示。

12）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Everything 命令，显示完成的模型如图 11-29 所示。

13）完成模型建立后，开始设置求解参数。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Time Controls>Solution Time 命令，弹出图 11-30 所示的 Solution Time for LS-DYNA Explict 对话框，设置求解时间为 0.015，单击 OK 按钮。

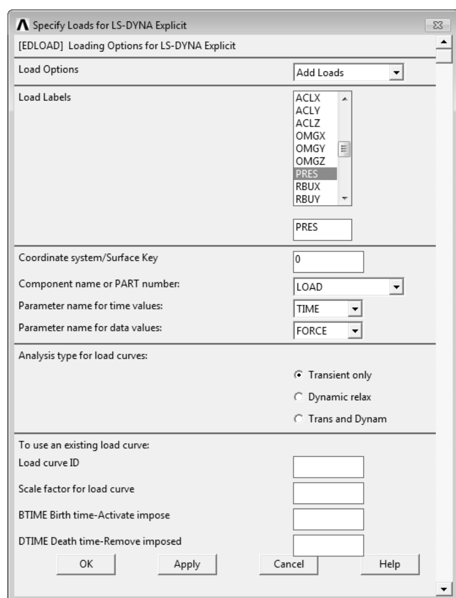


图 11-27　Specify Loads for LS-DYNA Explict 对话框

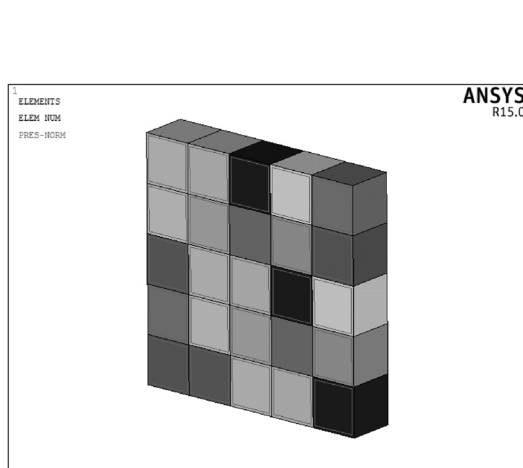


图 11-28　施加载荷

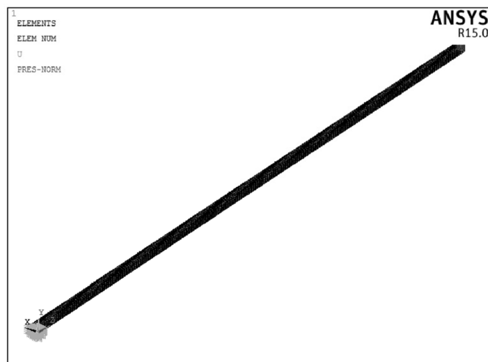


图 11-29　完成模型建立

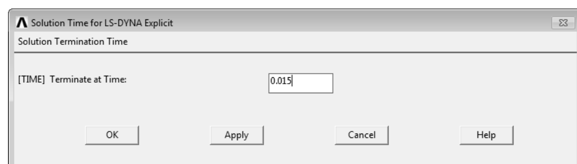


图 11-30　Solution Time for LS-DYNA Explict 对话框

14）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Output Controls>File Output Freq>Number of Steps 命令，弹出图 11-31 所示的 Specify File Output Frequency 对话框，设置输入的步数为 100，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Output Controls>Output File Types 命令，弹出图 11-32 所示的定义输出类型对话框，设置如图 11-32 所示，单击 OK 按钮完成。

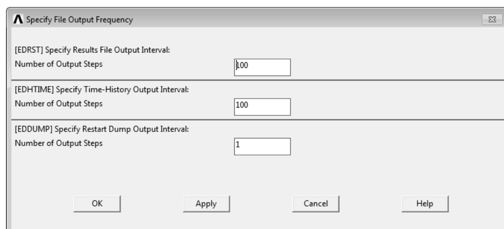


图 11-31　Specify File Output Frequency 对话框

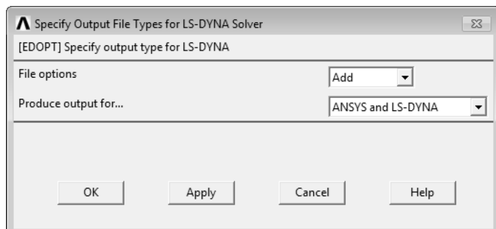


图 11-32　设置输出文件类型

15）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Solve 命令，弹出求解详情，单击“OK”按钮开始求解。

16）完成求解后，即可以像常规的 ANSYS 后处理一样查看结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Read Results> First Set 命令，读入第一步的结果。在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 11-33 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择位移矢量和，如图 11-33 所示，单击 OK 按钮，显示初始位移云图如图 11-34 所示。

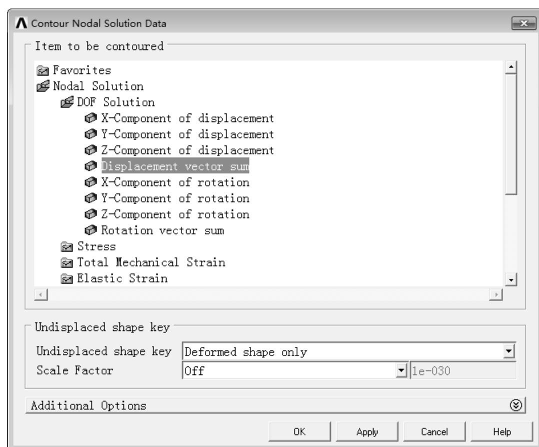


图 11-33　Contour Nodal Solution Data 对话框

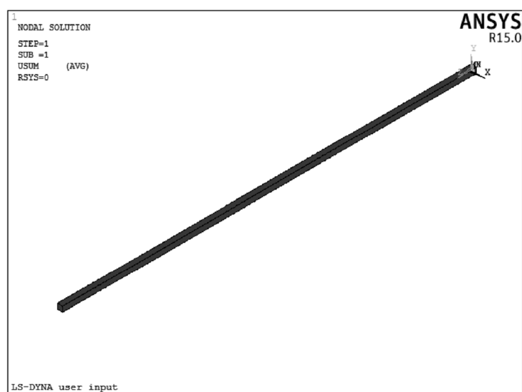


图 11-34　初始位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Read Results>Next Set 命令，依次读取其后四阶结果，显示各时期位移云图如图 11-35～图 11-38 所示。

17）在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 11-39 所示的对话框。选择第一主应力单击 OK 按钮，显示如图 11-40 所示。

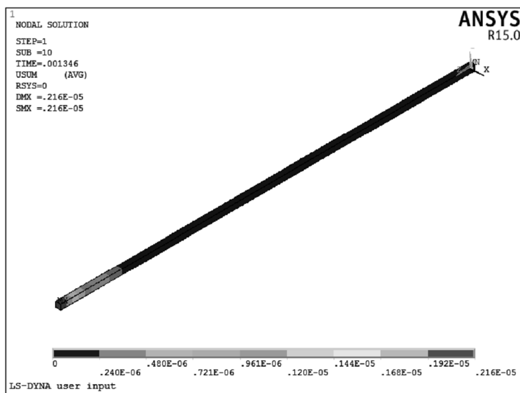


图 11-35　第 10 步位移云图

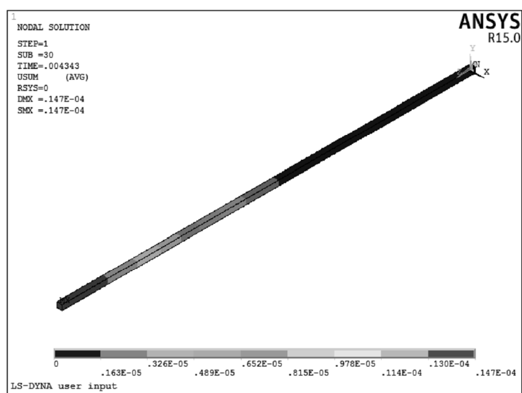


图 11-36　第 30 步位移云图

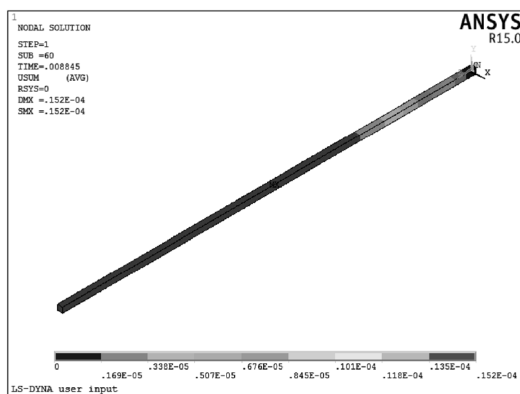


图 11-37 第 60 步位移云图

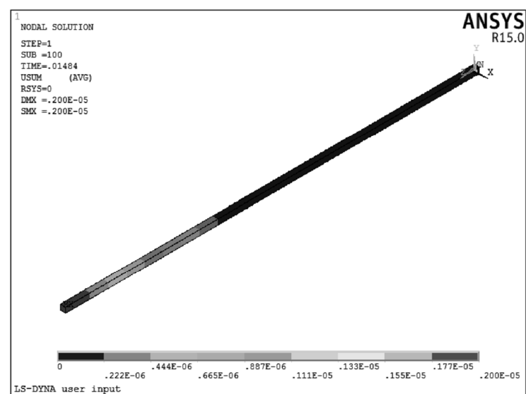


图 11-38 第 100 步位移云图

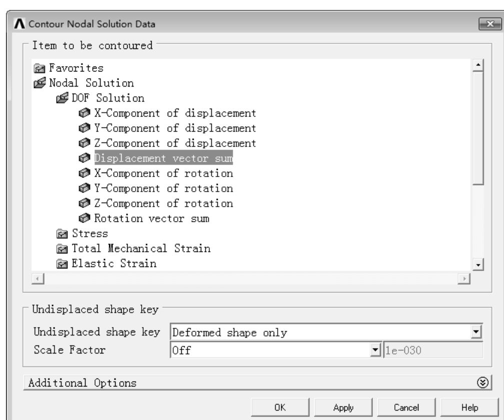


图 11-39 Contour Nodal Solution Data 对话框

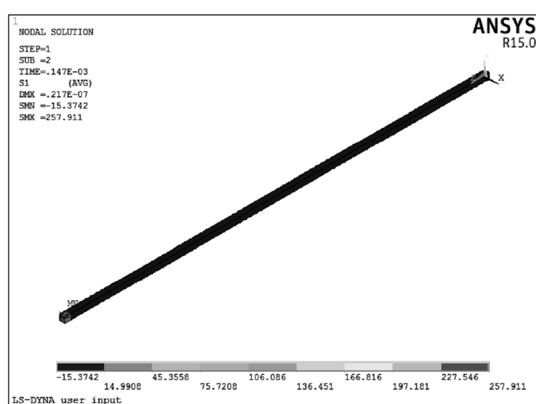


图 11-40 初始应力云图

依次读取其后各阶结果，显示各时期位主应力云图如图 11-41～图 11-44 所示。

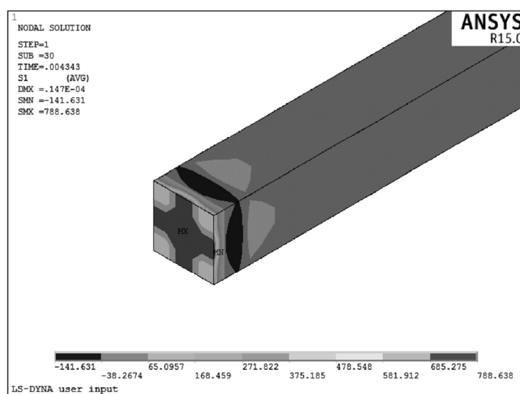


图 11-41 第 30 子步应力云图

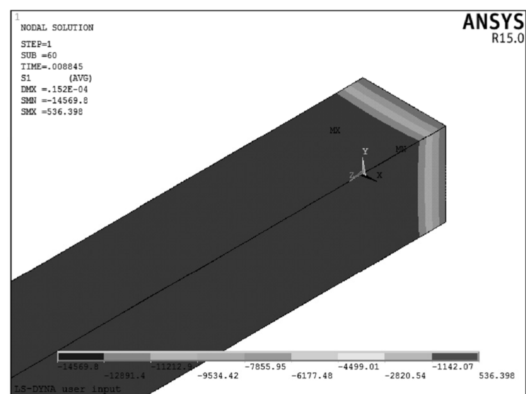
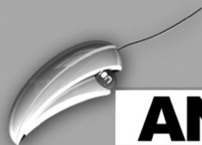


图 11-42 第 60 子步应力云图



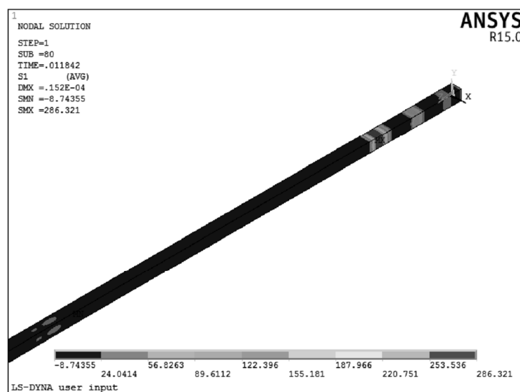


图 11-43　第 80 子步应力云图

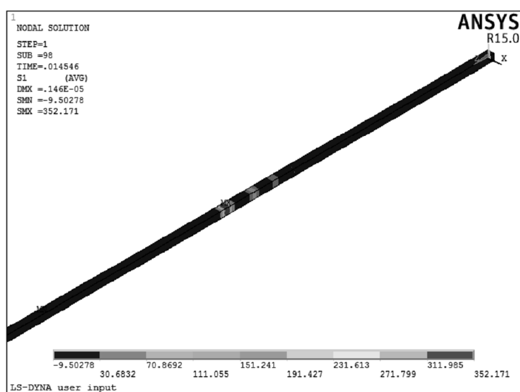


图 11-44　第 60 子步应力云图

单击工具栏中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框。选择 Save Everything 选项，保存所有项目，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

11.3　本章小结

显式动态分析也即 ANSYS 的 LS-DYNA 模块，是相对于 ANSYS 标准的隐式动力学分析而言的。显式动态分析用于模拟非常大的变形，惯性力占支配地位，并考虑所有的非线性行为。

进行显式动态分析时，用户需要注意的是：启动时要加载 LS-DYNA 模块，选用单元必需使用 LS-DYNA 单元，需要考虑所有的非线性行为，进行求解配置时要考虑是否使用 ANSYS 的隐式后处理器。

显式动态分析的基本过程也常用的 ANSYS 隐式分析相类似：建模、加载、求解、后处理。用户不必担心操作不适应的问题。

显式动态分析有专用的单元，主要是 LINK160（显式三维杆单元）、BEAM161（显式三维梁单元）、SHELL163（显式结构薄壳）、SOLID164（显式三维结构实体）、COMBI165（显式弹簧-阻尼单元）、MASS166（显式三维结构质量）和 LINK167（显式承拉杆单元）等，进行显式分析应选用这些单元。

进行操作之前，建议将 Preference 选项置为 LS-DYNA Explicit，过滤掉杂项。

施加载荷时，显示分析中的所有载荷必须与时间有关，这一点与隐式分析不同，需要注意。

本章为读者提供了一个显式动态分析的实例，用户根据这个例子，可以举一反三，学习分析过程，在今后遇到需要进行显式动态分析时可以灵活运用相关技能。



第 12 章　起重机综合分析

门式起重机是桥式起重机的一种变形，主要用于室外的货场、料场货、散货的装卸作业。它的金属结构像门形框架，承载主梁下安装两条支脚，可以直接在地面的轨道上行走，主梁两端可以具有外伸悬臂梁。门式起重机具有场地利用率高、作业范围大、适应面广、通用性强等特点，在港口货场得到广泛使用。

本章学习目标

- 掌握进行综合分析的方法。
- 掌握接触分析的方法。
- 掌握时间历程分析的方法。
- 掌握移动载荷的使用方法。
- 掌握 APDL 编程的方法。

12.1　实例背景

如图 12-1 所示为工程中常用的门式起重机。按门框结构形式分为门式起重机和悬臂门式起重机。

（1）门式起重机

全门式起重机：主梁无悬伸，小车在主跨度内进行。

半门式起重机：支腿有高低差，可根据使用场地的土建要求而定。

（2）悬臂门式起重机

双悬臂门式起重机：最常见的一种结构形式，其结构的受力和场地面积的有效利用都是合理的。

单悬臂门式起重机：这种结构形式往往是因场地的限制而被选用。



图 12-1　门式起重机

● 按主梁形式分为单主梁门式起重机与双主梁门式起重机

单主梁门式起重机结构简单，制造安装方便，自身质量小，主梁多为偏轨箱形架结构。与双主梁门式起重机相比，整体刚度要弱一些。因此，当起重量 Q≤50t、跨度 S≤35m 时，可采用这种形式。单主梁门式起重机门腿有 L 形和 C 形两种形式。L 形的制造安装方便，受力情况好，自身质量较小，但是，吊运货物通过支腿处的空间相对小一些。C 型的支脚做成倾斜或弯曲形，目的在于有较大的横向空间，以使货物顺利通过支脚。

双主梁门式起重机承载能力强，跨度大、整体稳定性好，品种多，但自身质量与相同起重量的单主梁门式起重机相比要大些，造价也较高。根据主梁结构不同，又可分为箱形梁和桁架两种形式。目前一般多采用箱形结构。

● 按主梁结构分为桁架梁、箱梁、蜂窝梁

桁架梁式使用角钢或工字钢焊接而成，优点是造价低，自重轻，抗风性好。但是由于焊点多和桁架自身的缺陷，桁架梁也具有挠度大，刚度小，可靠性相对较低，需要频繁检测焊点等缺点。适用于对安全要求较低，起重量较小的场地。

箱梁式使用钢板焊接成箱式结构，具有安全性高，刚度大等特点。一般用于大吨位及超大吨位的门式起重机。如图 12-1 所示为 MGhz1200，起重量 1200t，为国内最大的门式起重机，主梁采用了箱梁结构。箱梁同时也具有造价高，自重大，抗风性较差等缺点。

蜂窝梁式一般指“等腰三角形蜂窝梁”，主梁端面为三角形，两侧斜腹上有蜂窝孔，上下部有弦杆。蜂窝梁吸收了桁架梁和箱梁的特点，较桁架梁具有较大的刚度，较小的挠度，可靠性也较高。但是由于采用钢板焊接，自重和造价也比桁架梁稍高。适用于使用频繁或起重量大的场地或梁场。由于这种梁型为专利产品，因此生产厂家较少。

12.2 分析过程

本节将详细讲述起重机的综合分析过程，本例的分析过程以 GUI 界面操作为主，少量涉及 APDL 命令操作的方法，本例的完整命令流可以在光盘中找到，为读者提供参考。用户应尽量尝试自己动手编写命令流，与光盘中的示例进行对比。

12.2.1 静力学分析

1）启动 Mechanical APDL Product Launcher 15.0，弹出 Mechanical APDL Product Launcher 15.0 窗口。设置参数、工作目录、工作名称，单击 Run 按钮进入 ANSYS 15.0 GUI 界面。

2）在 GUI 界面中选择 Utility Menu> Parameters> Scalar Parameters 命令，定义如表 12-1 所示参数。

表 12-1 定义参数

参 数 名 称	值	参 数 名 称	值
B	40	L_H	40
H	15	B_H	2
L	120	H_H	2
L_S	20	L_KZ	80
L_S_1	10	H_KZ	4

（续）

参数名称	值	参数名称	值
H_S_1	4	B_KZ	2
B_S_1	2	L_ZC	15
L_S_2	10	HS_ZC	4
H_S_2	2	B_ZC	2
B_S_2	2	L_KJ	40
U_L	0.3	H_KJ	4
DENS_L	7800	B_KJ	2
T	0.5	E_L	2.10E+10

完成定义的参数如图 12-2 所示。

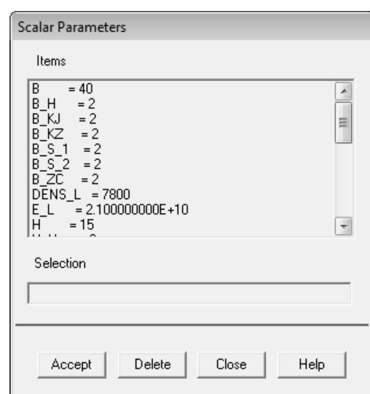


图 12-2　Scalar Paramters 对话框

3）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete 命令，单击 Add 按钮，弹出图 12-3 所示的 Library of Element Types 对话框，选择单元类型为 SHELL181。

4）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，弹出图 12-4 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选择材料模型为线弹性各向同性模型。

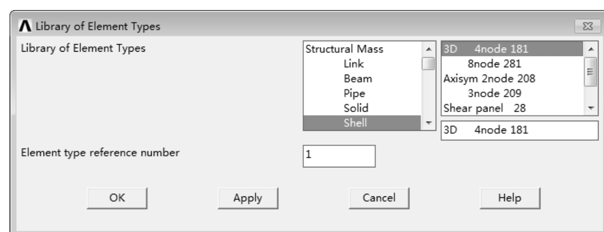


图 12-3　Library of Element Types 对话框

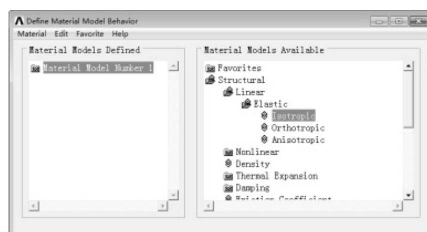
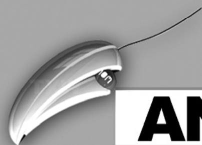


图 12-4　Define Material Model Behavior 对话框

弹出如图 12-5 所示的 Linear Isotropic Properties for Material Number1 对话框，输入材料参数如图 12-5 所示，单击 OK 按钮。回到图 12-4 所示的 Define Material Model Behavior 对话框，选



择密度，弹出图 12-6 所示的 Density for Material Number1 对话框，输入密度参数如图 12-6 所示，单击 OK 按钮完成材料模型的定义。

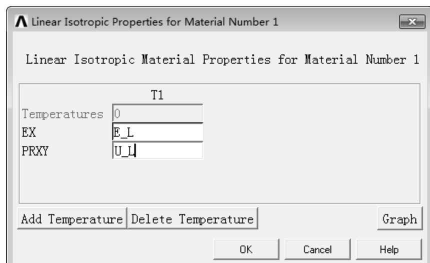


图 12-5　材料 1 线弹性参数设置

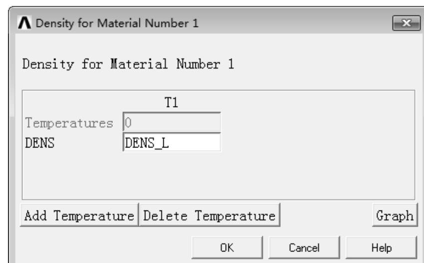


图 12-6　材料 1 密度设置

5）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Sections>Shell>Lay-up>Add / Edit 命令，弹出图 12-7 所示的 Create and Modify Shell Sections 对话框，输入厚度 T，单击 OK 按钮完成壳单元厚度的定义。

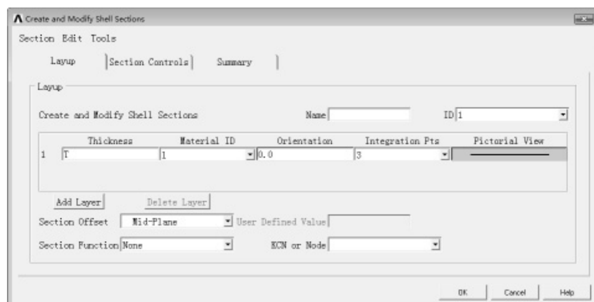


图 12-7　Create and Modify Shell Sections 对话框

6）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 命令，弹出图 12-8 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，输入表 12-2 中的 1 号关键点的编号与坐标，单击 Apply 按钮，继续定义关键点，直到完成表 12-2 所列的全部关键点的定义，结果应如图 12-9 所示。

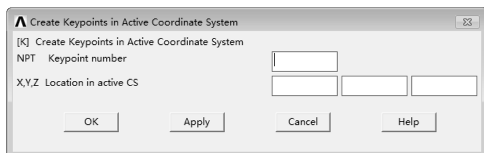


图 12-8　Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

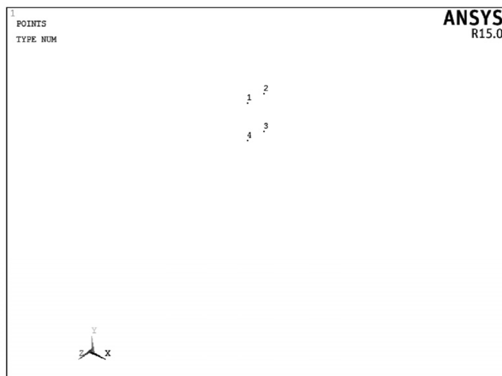


图 12-9　定义关键点

表 12-2 关键点列表

关键点号	X	Y	Z
1	0	H+H_KZ/2	-B/2+B_KZ/2
2	0	H+H_KZ/2	-B/2-B_KZ/2
3	0	H-H_KZ/2	-B/2-B_KZ/2
4	0	H-H_KZ/2	-B/2+B_KZ/2

7）在 GUI 界面选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Keypoints 命令，单击 Pick All 按钮，弹出图 12-10 所示的 Copy Keypoints 对话框，设置平移距离为 X= L_KZ/2，编号增量为 100，单击 OK 按钮生成新的关键点，如图 12-11 所示。

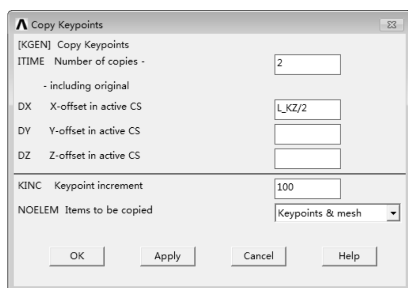


图 12-10 Copy Keypoints 对话框

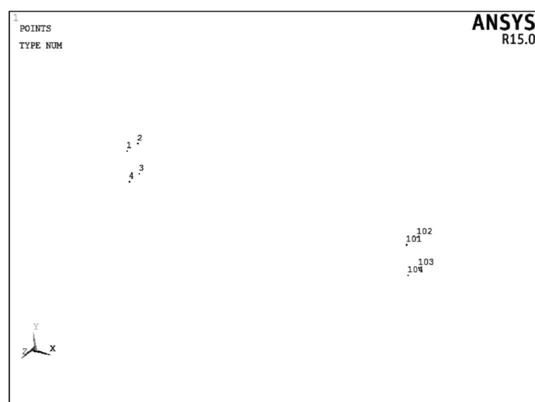


图 12-11 复制 1～4 号关键点

8）在 GUI 界面选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy> Keypoints 命令，拾取 103、104 号关键点并单击 Apply 按钮，弹出图 12-12 所示的 Copy Keypoints 对话框，设置平移距离为 X= −B_ZC/2，单击 OK 按钮生成新的关键点如图 12-13 所示。

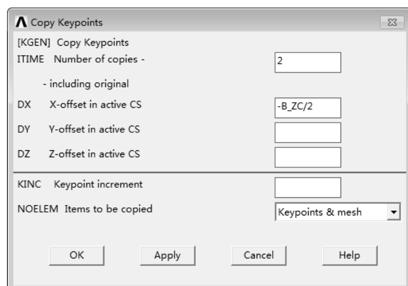


图 12-12 Copy Keypoints 对话框

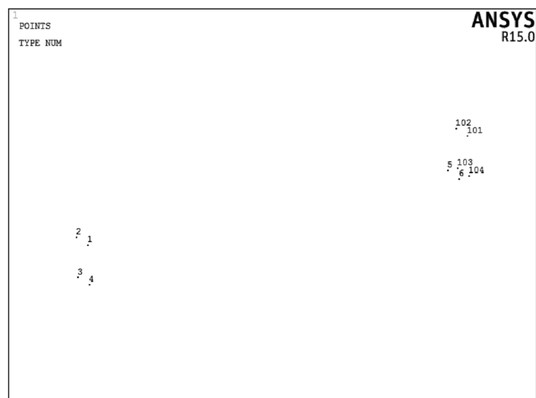
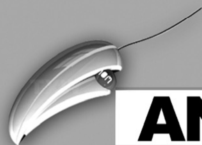


图 12-13 复制 103、104 号关键点

重复上述操作，复制对象仍为 103、104 号点，平移距离为 X=B_ZC/2，再次复制这两



个关键点，结果应如图 12-14 所示。

请读者自行动手操作，完成 1～4 关键点的再次复制，平移距离为 X=L_KZ/2+L_S_1，编号增量为 200，结果应如图 12-15 所示。

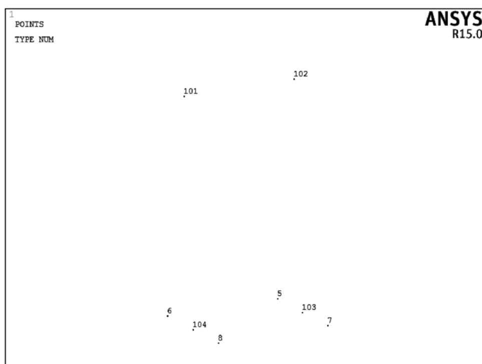


图 12-14　再次复制 103、104 号关键点

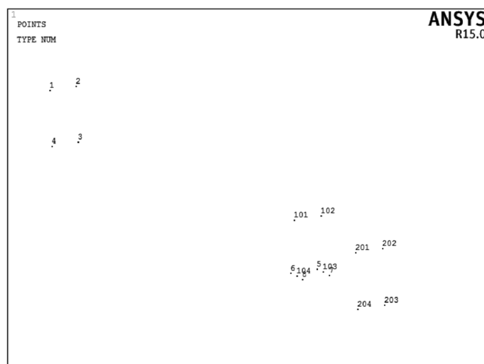


图 12-15　复制 1～4 号点

9）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 命令，弹出图 12-16 所示的 Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框，输入表 12-3 中的 301 号关键点的编号与坐标，单击 Apply 按钮，继续定义关键点，直到完成表 12-3 所列的全部关键点的定义，结果应如图 12-17 所示。

表 12-3　关键点列表

关 键 点 号	X	Y	Z
301	L/2+B_H/2	H+H_KZ/2	-B/2+B_KZ/2
302	L/2+B_H/2	H+H_KZ/2	-B/2-B_KZ/2
303	L/2+B_H/2	H+H_KZ/2-H_H	-B/2-B_KZ/2
304	L/2+B_H/2	H+H_KZ/2-H_H	-B/2+B_KZ/2

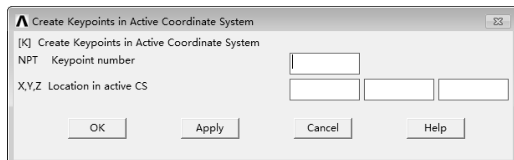


图 12-16　Create Keypoints in Active Coordinate System 对话框

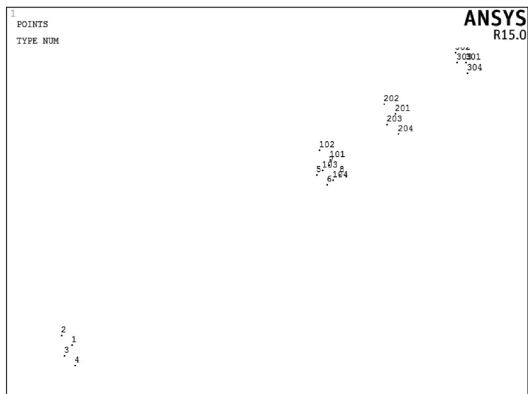


图 12-17　定义关键点

10）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy> Keypoints 命令，拾

取 5～8 号关键点并单击 Apply 按钮，弹出图 12-18 所示的 Copy Keypoints 对话框，设置平移距离为 Y= -L_ZC，单击 OK 按钮生成新的关键点，如图 12-19 所示。

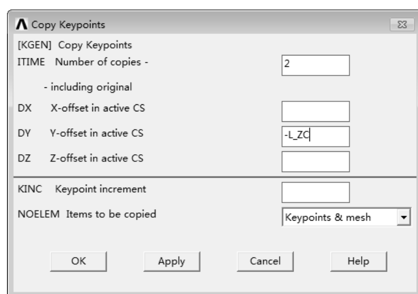


图 12-18 Copy Keypoints 对话框

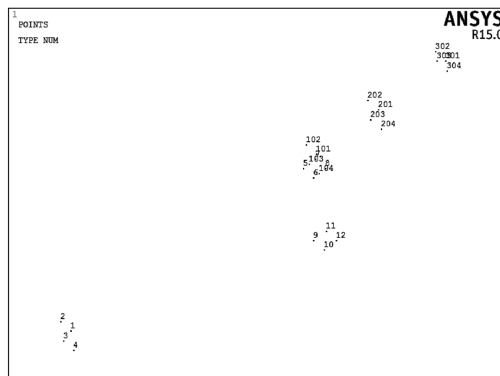


图 12-19 复制 5～8 号关键点

11）重复上一步操作。对表 12-4 所列关键点进行复制操作。完成复制操作如图 12-20 所示。

表 12-4 需要复制的关键点

关 键 点	偏 移 量
302、303	X=B_H
13、14	Z=L_H/2+B_KZ
15、16	X=-B_H
9、11	Y=-H_KJ
19、20	Z=L_H/2+B_KZ
21、22	Y=H_KJ

12）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary>Through KPs 命令，按顺序拾取工作区中的 1、2、302、301、1 号节点，单击 OK 按钮完成面的定义，如图 12-21 所示。

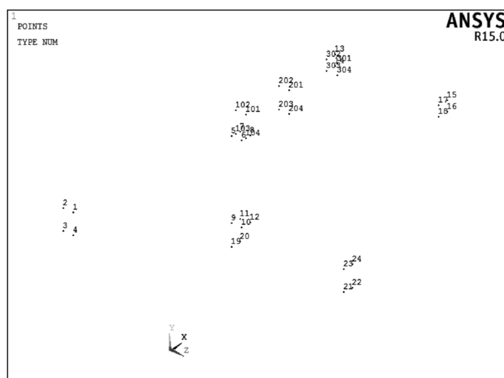


图 12-20 完成复制点

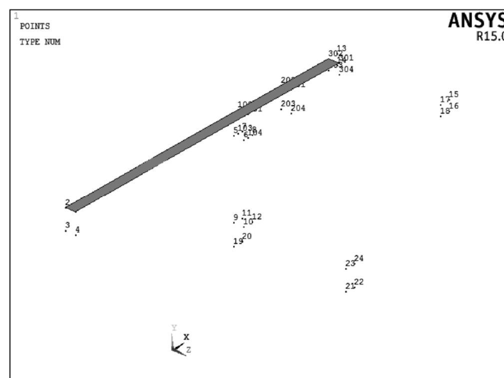


图 12-21 生成第一个面

13）重复上述通过关键点生成面的操作，按顺序定义如表 12-5 所列出的面，关键点按顺序连接围成面。

表 12-5 围成面的关键点

序 号	关 键 点 号				
1	2	202	203	3	2
2	202	302	303	203	202
3	201	301	304	204	201
4	201	204	4	1	201
5	6	10	12	8	6
6	8	12	11	7	8
7	7	11	9	5	7
8	6	10	9	5	6
9	3	4	6	5	3
10	203	204	304	303	203
11	302	303	14	13	302
12	201	204	304	301	201
13	13	15	16	14	13
14	302	17	15	13	302
15	301	17	18	304	301
16	303	18	16	14	303
17	9	19	20	11	9
18	11	24	22	20	11
19	20	22	21	19	20
20	21	19	9	23	21
21	10	23	24	12	10

完成表 12-5 所列的关键点围成面的操作结果，如图 12-22 所示。

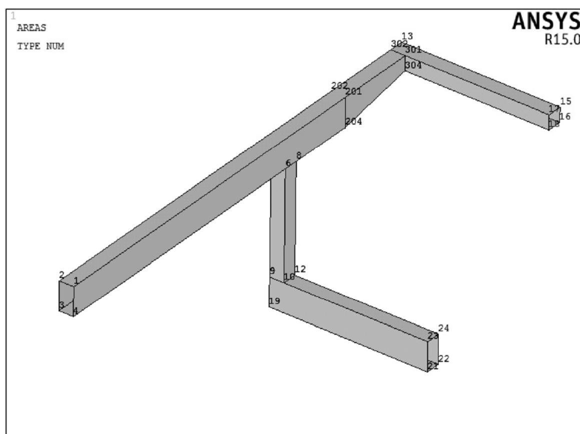


图 12-22 生成面

14）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Areas 命令，单击 Pick All 按钮，弹出图 12-23 所示的 Reflect Areas 对话框，对称面的法向为 X，单击 OK 按钮，完成镜像如图 12-24 所示。

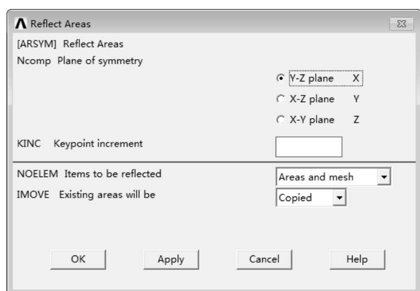


图 12-23 Reflect Areas 对话框

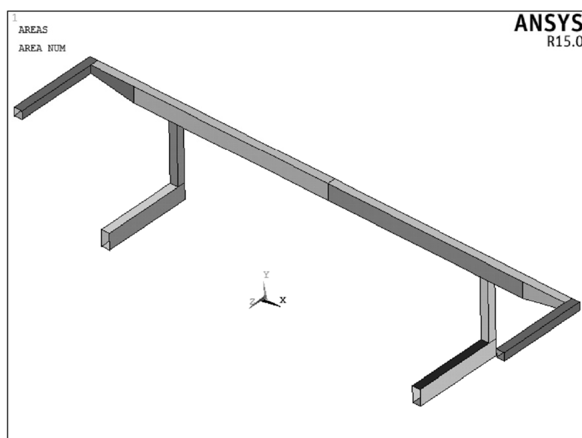


图 12-24 镜像

15）重复上述镜像操作，以 XY 平面对称，单击 OK 按钮，完成镜像操作如图 12-25 所示。

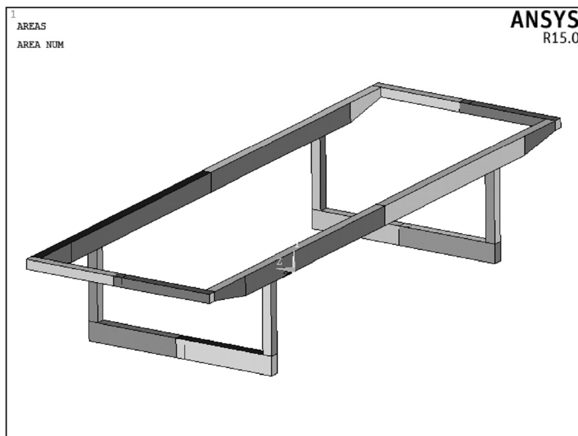


图 12-25 整体模型

16）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Merge Items 命令，弹出图 12-26 所示的 Merge Coincident of Equivalently Defined Items 对话框。选择要合并的项目为关键点，其余保持默认，单击 OK 按钮完成。

17）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Global>Size 命令，弹出图 12-27 所示的 Global Element Sizes 对话框，定义单元边长为 1，单击 OK 按钮完成。

18）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>3 or 4 sided 命令，单击 Pick All 按钮，完成所有面的划分，如图 12-28 所示。

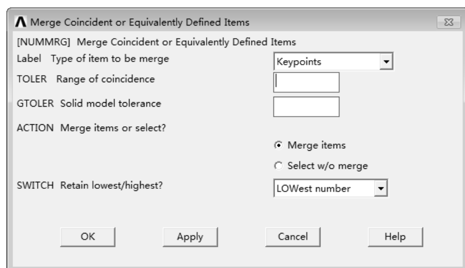


图 12-26 Merge Coincident of Equivalently Defined Items 对话框

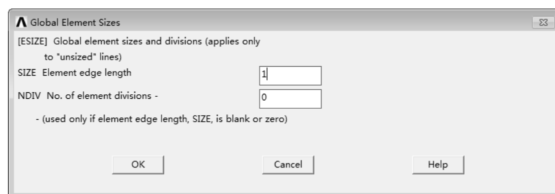


图 12-27 Global Element Sizes 对话框

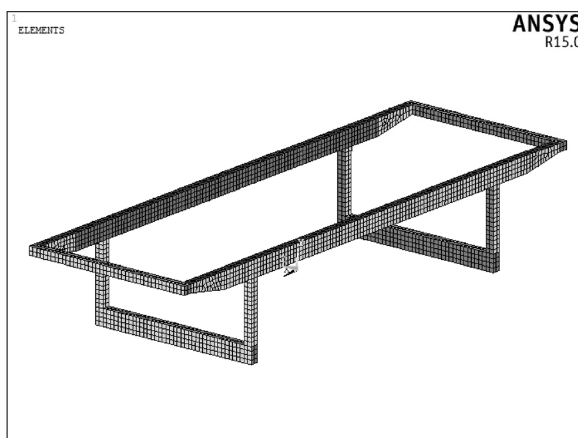


图 12-28 完成面的划分

19）此时模型建立完毕，如图 12-29 所示为显示单元厚度的模型，箱梁的细节如图 12-30 所示。

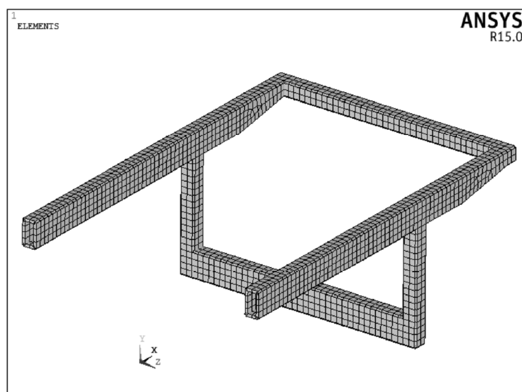


图 12-29 显示单元厚度

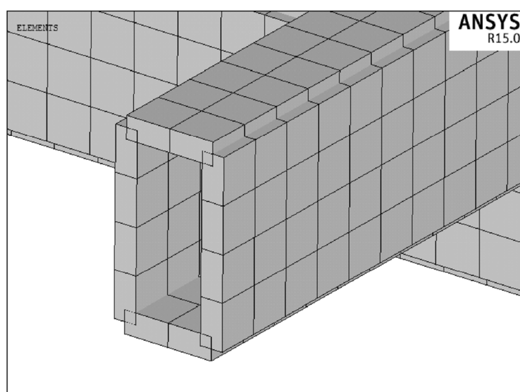


图 12-30 箱梁细节

20）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，弹出图 12-31 所示的 Select Entities 对话框，设置选择对象为 Areas，选择方式为 From Full，单击 Apply 按钮，弹出图 12-32 所示的 Select areas 对话框。



图 12-31　Select Entities 对话框

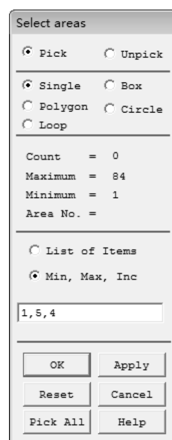


图 12-32　Select areas 对话框

选择编号定义方式为 Min，Max，Inc，在输入框中输入 1,5,4，单击 OK 按钮。选出如图 12-33 所示面。

回到图 12-31 所示的 Select Entities 对话框，将选择方式改 Also Select，单击 Apply 按钮，参照上述方式，选择出表 12-6 所列出的全部面，结果如图 12-34 所示。

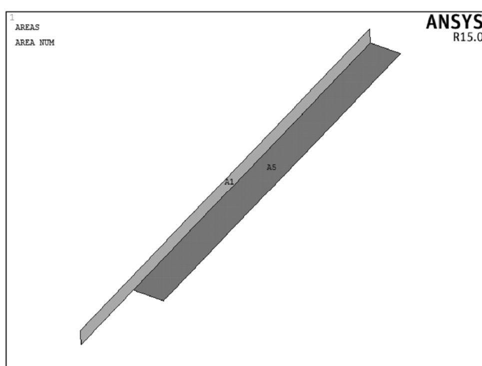


图 12-33　选出面

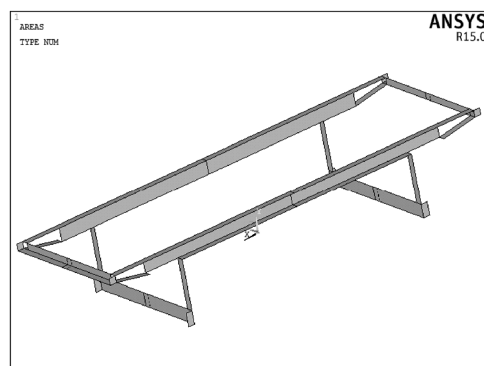


图 12-34　完成面的选择

表 12-6　选出面

Min	Max	Inc
1	5	4
22	26	4
43	47	4
64	68	4
30	72	42
41	83	42
20	62	42
9	51	42

（续）

Min	Max	Inc
36	78	42
15	57	42
75	80	5
54	59	5
12	17	5
33	38	5
53	58	5
11	16	5
32	37	5
74	79	5
10	31	21
52	73	21

21）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Move / Modify>Reverse Normals>of Areas 命令，单击 Pick All 按钮，完成法向反转。

22）在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，参考前文的说明，选择出 40、82、19、61 四个面如图 12-35 所示。在 Select Entities 对话框中，更改选择对象为 Nodes，选择方式为 Attached to，单击 OK 按钮。选出这些面上的节点如图 12-36 所示。

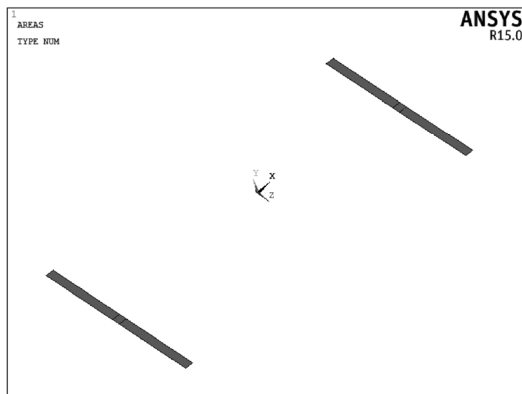


图 12-35　选出面

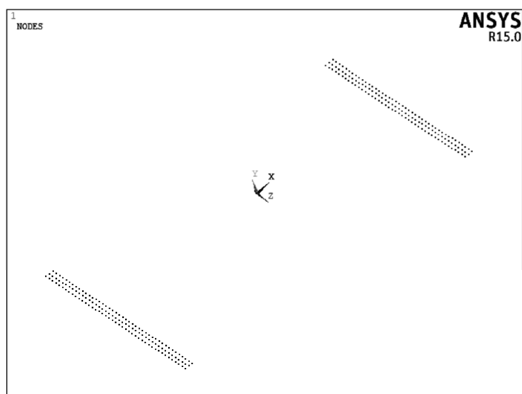


图 12-36　选出节点

23）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 命令，单击 Pick All 按钮，弹出图 12-37 所示的 Apply U，ROT on Nodes 对话框。

设置约束的自由度为 All DOF，单击 OK 按钮完成约束如图 12-38 所示。

24）至此，已完成模型的建立与约束的定义，在此基础之上进行分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 命令，弹出图 12-39 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Static（即静态分析），单击 OK 按钮完成分析类型设置。

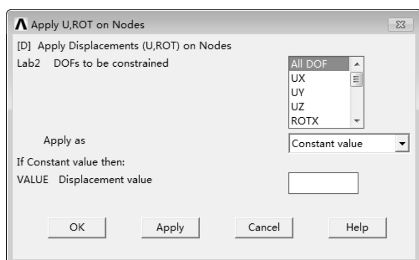


图 12-37 Apply U，ROT on Nodes 对话框

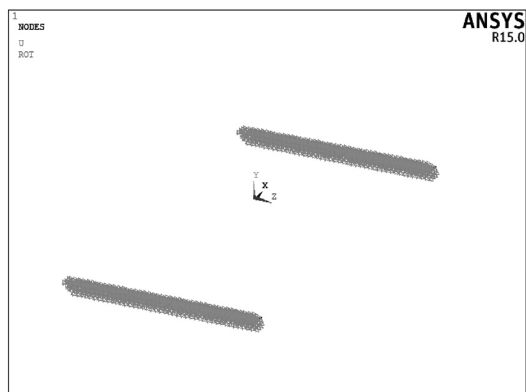


图 12-38 定义约束

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global 命令，弹出图 12-40 所示的 Apply（Gravitational）Acceleration 对话框，输入重力加速度为 Y=9.8，单击 OK 按钮完成。

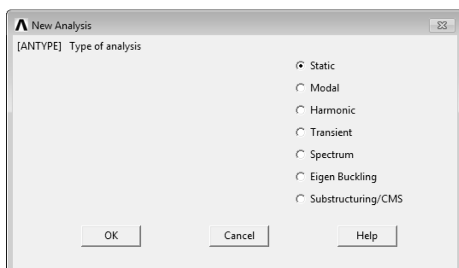


图 12-39 New Analysis 对话框

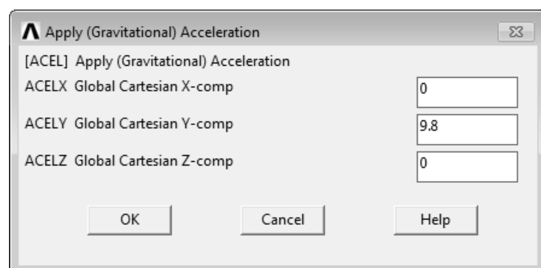


图 12-40 Apply（Gravitational）Acceleration 对话框

25）在 GUI 界面中选择 Main Menu> Solution> Solve> Current LS 命令，弹出图 12-41 所示的 STATUS Command 窗口，窗口中显示了项目的求解信息及输出选项。

同时弹出的还有图 12-42 所示的 Solve Current Load Step 对话框，询问用户是否开始进行求解。

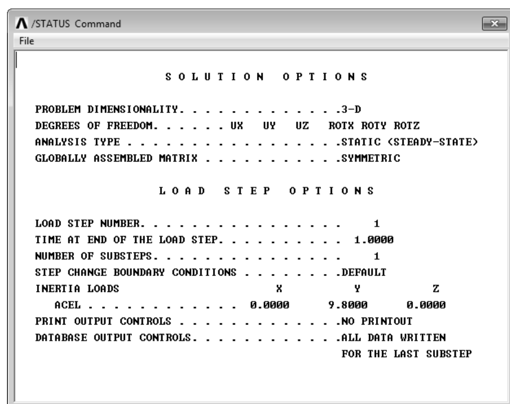


图 12-41 STATUS Command 窗口

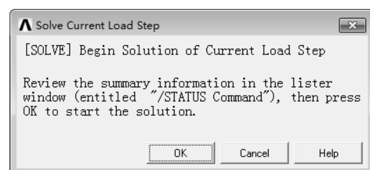


图 12-42 Solve Current Load Step 对话框

单击 Solve Current Load Step 对话框中的 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。

本例的分析过程也可以由命令方式进行。

```
FINI                                                    !清空工作区
/CLE                                                    !
/NERR，，99999999                                       !调整警告数量限制
*SET，B，40                                             !!定义参数
*SET，H，15                                             !
*SET，L，120                                            !
*SET，L_S，20                                           !
*SET，L_S_1，10                                         !
*SET，H_S_1，4                                          !
*SET，B_S_1，2                                          !
*SET，L_S_2，10                                         !
*SET，H_S_2，2                                          !
*SET，B_S_2，2                                          !
*SET，L_H，40                                           !
*SET，B_H，2                                            !
*SET，H_H，2                                            !
*SET，L_KZ，80                                          !
*SET，H_KZ，4                                           !
*SET，B_KZ，2                                           !
*SET，L_ZC，15                                          !
*SET，HS_ZC，4                                          !
*SET，B_ZC，2                                           !
*SET，L_KJ，40                                          !
*SET，H_KJ，4                                           !
*SET，B_KJ，2                                           !
*SET，E_L，2.1E10                                       !
*SET，U_L，0.3                                          !
*SET，DENS_L，7800                                      !
*SET，T，0.5                                            !
                                                        !
/PREP7                                                  !进入前处理
ET，1，182                                              !单元类型
MP，EX，1，E_L                                          !材料参数
MP，PRXY，1，U_L                                        !
MP，DENS，1，DENS_L                                     !
F=0.25*(45E4*1.02+60E4*1.2)                             !参数用于定义载荷
SECTYPE，，SHELL                                        !定义截面
SECDATA，T                                              !
                                                        !
K，1，0，H+H_KZ/2，-B/2+B_KZ/2                          !生成关键点
K，2，0，H+H_KZ/2，-B/2-B_KZ/2                          !
```



```
K，3，0，H-H_KZ/2，-B/2-B_KZ/2                          !
K，4，0，H-H_KZ/2，-B/2+B_KZ/2                          !
KGEN，2，1，4，1，L_KZ/2,,，100                          !复制关键点
KGEN，2，103，104，1，-B_ZC/2                            !
KGEN，2，103，104，1，B_ZC/2                             !
KGEN，2，1，4，1，L_KZ/2+L_S_1,,，200                    !
K，301，L/2+B_H/2，H+H_KZ/2，-B/2+B_KZ/2                 !定义关键点
K，302，L/2+B_H/2，H+H_KZ/2，-B/2-B_KZ/2                 !
K，303，L/2+B_H/2，H+H_KZ/2-H_H，-B/2-B_KZ/2             !
K，304，L/2+B_H/2，H+H_KZ/2-H_H，-B/2+B_KZ/2             !
KGEN，2，5，8，1,，-L_ZC，                               !复制关键点
KGEN，2，302，303，1，B_H                                !
KGEN，2，13，14，1,,，L_H/2+B_KZ                         !
KGEN，2，15，16，1，-B_H                                 !
KGEN，2，9，11，2,，-H_KJ                                !
KGEN，2，19，20，1,,，L_H/2+B_KZ                         !
KGEN，2，21，22，1,，H_KJ                                !
                                                         !
A，1，2，302，301，1                                     !将关键点围成面
A，2，202，203，3，2                                     !
A，202，302，303，203，202                               !
A，201，301，304，204，201                               !
A，201，204，4，1，201                                   !
A，6，10，12，8，6                                       !
A，8，12，11，7，8                                       !
A，7，11，9，5，7                                        !
A，6，10，9，5，6                                        !
A，3，4，6，5，3                                         !
A，203，204，304，303，203                               !
A，302，303，14，13，302                                 !
A，201，204，304，301，201                               !
A，13，15，16，14，13                                    !
A，302，17，15，13，302                                  !
A，301，17，18，304，301                                 !
A，303，18，16，14，303                                  !
A，9，19，20，11，9                                      !
A，11，24，22，20，11                                    !
A，20，22，21，19，20                                    !
A，21，19，9，23，21                                     !
A，10，23，24，12，10                                    !
ARSYM，X，ALL                                            !镜像复制
ARSYM，Z，ALL                                            !
ALLSEL                                                   !
NUMMRG，KP                                               !合并重合的关键点
                                                         !
```

```
ESIZE，1                                 !定义单元尺寸
AMESH，ALL                               !划分面单元
ALLSEL                                   !
NUMMRG，ALL                              !合并重合的项目
ASEL，S，AREA,，1，5，4                   !选择面
ASEL，A，AREA,，22，26，4                 !
ASEL，A，AREA,，43，47，4                 !
ASEL，A，AREA,，64，68，4                 !
ASEL，A，AREA,，30，72，42                !
ASEL，A，AREA,，41，83，42                !
ASEL，A，AREA,，20，62，42                !
ASEL，A，AREA,，9，51，42                 !
ASEL，A，AREA,，36，78，42                !
ASEL，A，AREA,，15，57，42                !
ASEL，A，AREA,，75，80，5                 !
ASEL，A，AREA,，54，59，5                 !
ASEL，A，AREA,，12，17，5                 !
ASEL，A，AREA,，33，38，5                 !
ASEL，A，AREA,，53，58，5                 !
ASEL，A，AREA,，11，16，5                 !
ASEL，A，AREA,，32，37，5                 !
ASEL，A，AREA,，74，79，5                 !
ASEL，A，AREA,，10，31，21                !
ASEL，A，AREA,，52，73，21                !
AREVERSE，ALL                            !定义面的法向
ASEL，S,,，40，82，42                     !
ASEL，A,,，19，61，42                     !
NSLA，S，1                               !
D，ALL，ALL                              !约束底面
                                         !
/SOLU                                    !进入求解器
ANTYPE，STATIC                           !选择静态分析
ACEL，0，9.8                             !定义重力加速度
ALLSEL，all                              !
SOLVE                                    !求解
FINI                                     !
```

26）此时进入通用后处理器，即可以查看只在重力作用下的静态分析求解结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 12-43 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择 DOF Solution 列表中的 Displacement vector sum，单击 OK 按钮，即可在工作区中看到位移云图，如图 12-44 所示。同样的方法可以显示项目正应力的节点解如图 12-45 和图 12-46 所示。

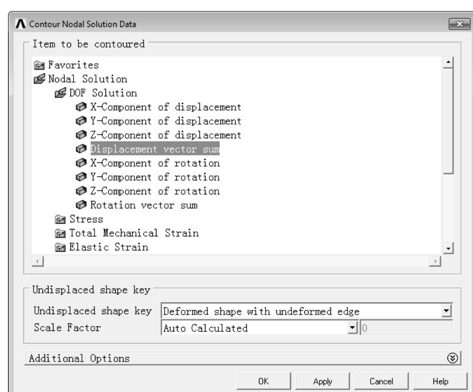


图 12-43　Contour Nodal Solution Data 对话框

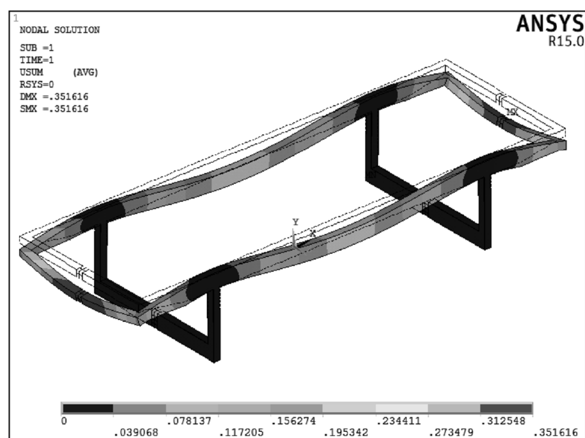


图 12-44　位移云图

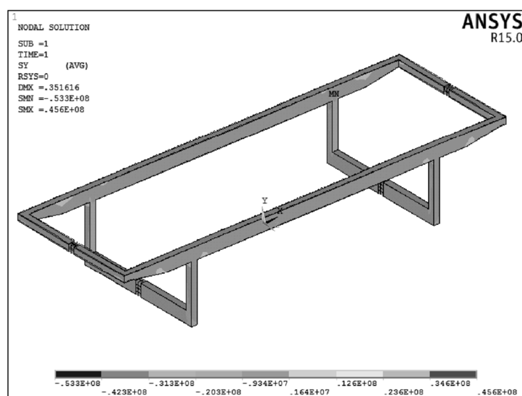


图 12-45　Y 方向应力云图

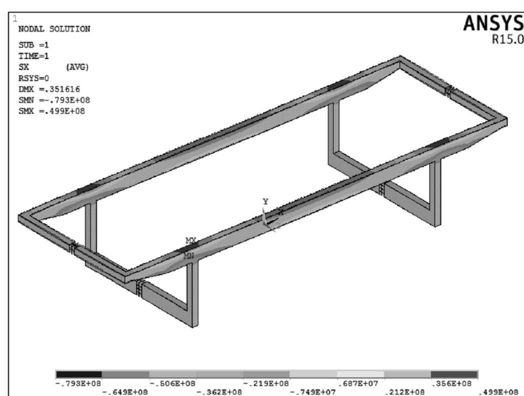


图 12-46　X 方向应力云图

节点剪应力与节点主应力如图 12-47 和图 12-48 所示。

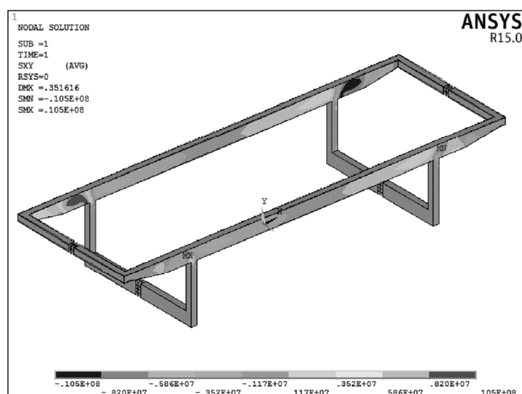


图 12-47　XY 剪应力云图

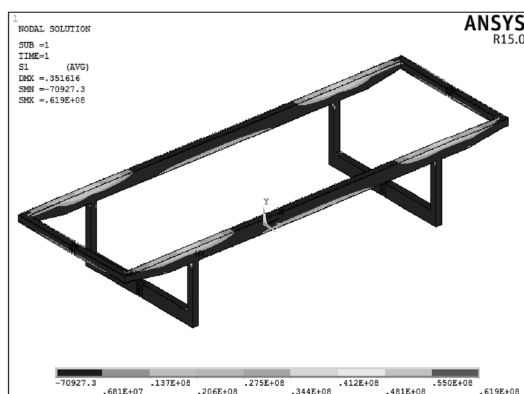


图 12-48　第一主应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Vector Plot> Predefined 命令，弹出图 12-49 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。

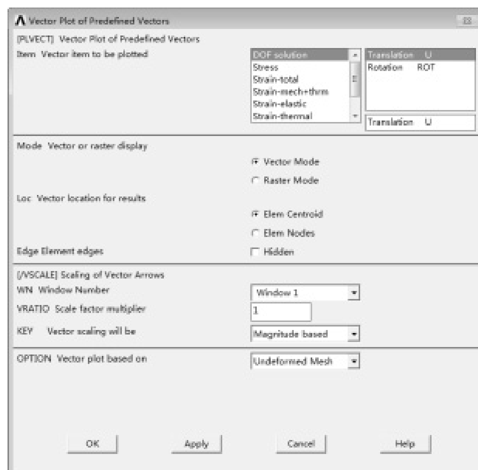


图 12-49　Vector Plot of Predefined Vectors 对话框

选择显示的矢量为 Translation U，单击 OK 按钮则显示图 12-50 所示的平移矢量，选择显示的矢量为 Rotation ROT，单击 OK 按钮则显示图 12-51 所示的转动矢量。

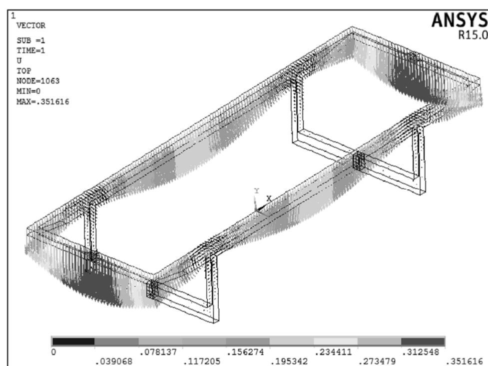


图 12-50　平移矢量

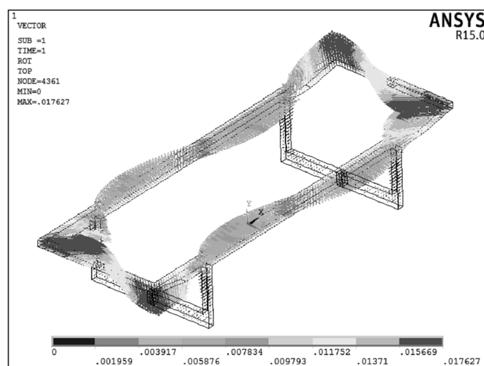


图 12-51　转动矢量

参考上述方法，显示主应力矢量如图 12-52 所示。

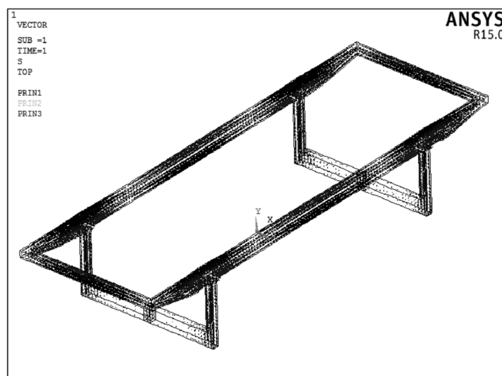


图 12-52　主应力矢量

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>PlotCtrls> Symbols 命令，弹出图 12-53 所示的 Symbols 对话框。

在图 12-53 所示的 Symbols 对话框中选择 All Reactions 选项，单击 OK 按钮。在 GUIL 界面中选择 Utility Menu> Plot> Elements 命令，则工作区中显示底部约束反力如图 12-54 所示。

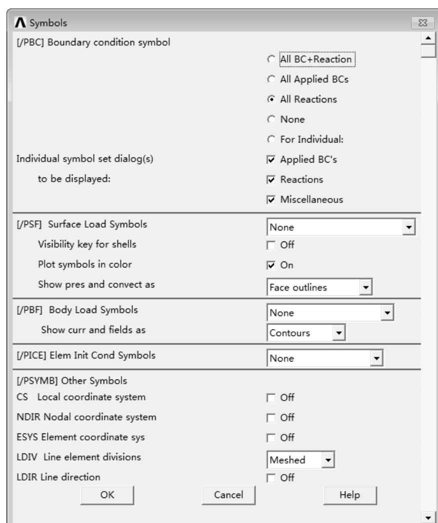


图 12-53 Symbols 对话框

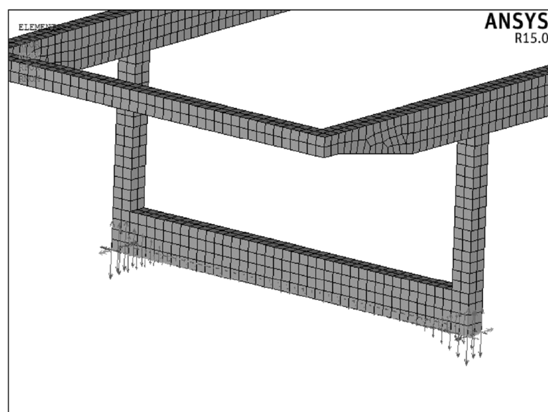


图 12-54 约束反力

12.2.2 瞬态动力学分析

1）完成静力求解后，进行动态分析，求解其在移动载荷下的瞬响应。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 命令，弹出图 12-55 所示的 New Analysis 对话框，将分析类型选择为 Transient（即瞬态分析），单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Transient 命令，弹出图 12-56 所示的 Solution Controls 对话框，设置如图 12-56 所示，单击 OK 按钮完成。

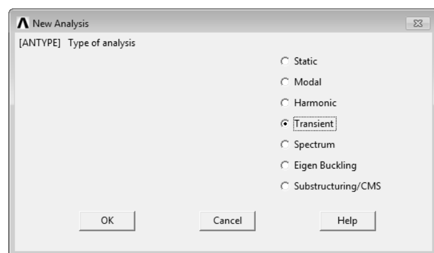


图 12-55 New Analysis 对话框

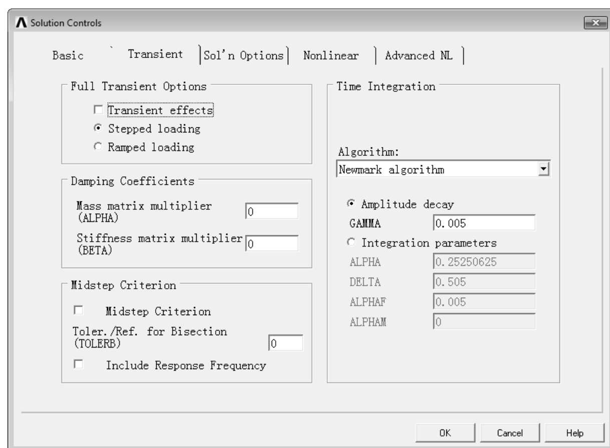


图 12-56 Solution Controls 对话框

在图 12-56 所示的 Solution Controls 对话框选择 Basic 选项卡，具体设置如图 12-57 所示。然后在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global 命令，弹出图 12-58 所示的 Apply（Gravitational）Acceleration 对话框，输入 Y=-9.8，如图 12-58 所示，单击 OK 按钮。

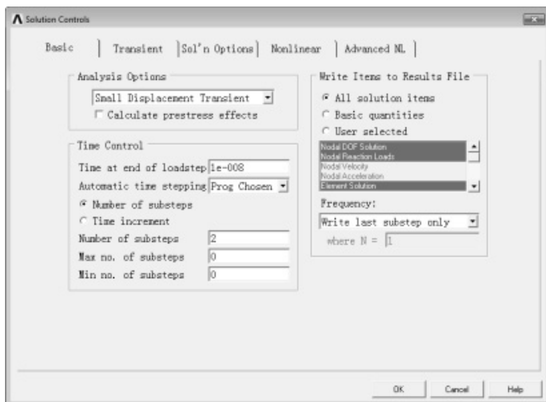


图 12-57　Basic 选项卡

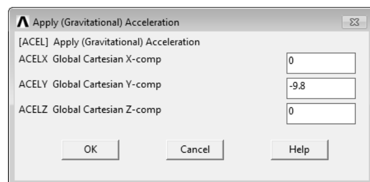


图 12-58　Apply（Gravitational）Acceleration 对话框

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 命令，单击 OK 按钮完成第 1 步求解。

2）完成第 1）步求解后，开始定义载荷。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Transient 命令，弹出 Solution Controls 对话框，在 Transient 选项卡中勾选 Transient effects 选项，定义加载方式为 Stepped loading，如图 12-59 所示，单击 OK 按钮。

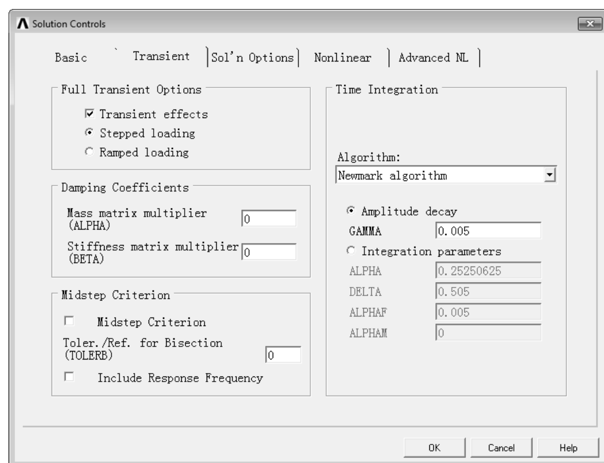


图 12-59　Transient 选项卡

3）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls 命令，在 Basic 选项卡中输入 TIME=1，单击 OK 按钮。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Preprocessor>Loads>Define Loads>Delete>All Load Data>All Forces>On All Nodes 命令，删除全部约束与载荷。

在 GUI 界面中选择 Utility Menu>Select>Entities 命令，使用 Select Entities 对话框选择出 X=−61 且 Y=17 且 Z=−20 的节点。选出的节点如图 12−60 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment> On Nodes 命令，弹出图 12−61 所示的 Apply F/M on Nodes 对话框。

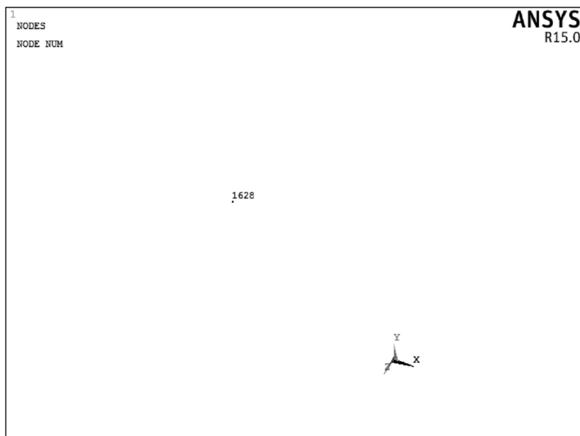


图 12−60　选出加载对象

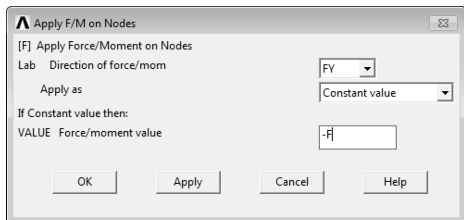


图 12−61　Apply F/M on Nodes 对话框

选择载荷的方向为 FY，值为−F。单击 OK 按钮完成。

重复上述操作，为 X=−53、Y=17、Z=−20 的节点施加 FY 方向、大小为−F 的集中力。

重复上述操作，为 X=−61、Y=17、Z=20 的节点施加 FY 方向、大小为−F 的集中力。

重复上述操作，为 X=53、Y=17、Z=20 的节点施加 FY 方向、大小为−F 的集中力。

完成这 4 个节点的加载后，进行输入控制。在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution> Load Step Opts>Output Ctrls>DB/Results File 命令，选择输出全部结果，单击 OK 按钮。

完成第一步输出设置后，在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write LS File 命令，弹出图 12−62 所示的 Write Load Step File 对话框，输入载荷步编号为 1，单击 OK 按钮完成第一个载荷步文件的定义。

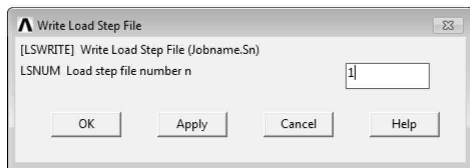


图 12−62　Write Load Step File 对话框

4）接下来，重复之前的操作，定义第 2 步～115 步的载荷步文件。在定义这些载荷步文件的时候，应注意如下问题。

- 对于第 I 步载荷步，上述 4 个节点的 X 坐标均应在第 25 步叙述所列出的坐标的基础上加（I-1），Y、Z 坐标值不变，载荷的方向及大小不变。
- 每一步载荷步均应使用 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls 命令，在 Basic 选项卡中输入 TIME 的值，每一步 TIME 的值等于当前载荷步的序号数。
- 每完成一次定义，使用一次 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Write LS File 命令，生成一个载荷步文件，每一步输入的编号比上一步增加 1。

5）完成载荷步定义后，在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Solve>From LS Files 命令，弹出图 12-63 所示的 Solve Load Step Files 对话框，输入 LSMIN=1，LSMAX=115，LSINC=1，单击 OK 按钮即开始求解。

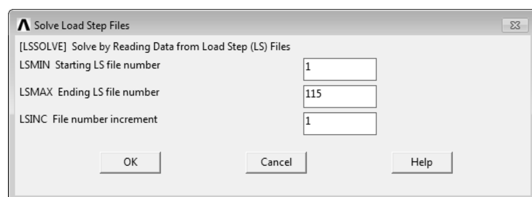


图 12-63　Solve Load Step Files 对话框

以上求解过程也可以使用 APDL 命令进行操作，且更为方便。

```
/SOLU                                   !进入求解器
ALLSEL                                  !全选模型
ANTYPE，TRANS                           !定义分析类型为瞬态分析
TRNOPT，FULL                            !全部求解器
TIMINT，OFF                             !关闭瞬态效应
NLGEOM，OFF                             !关闭大变形
TIME，1E-8                              !定义时间
NSUBST，2                               !子步数为 2
KBC，1                                  !使用阶跃加载
ACEL，0，-9.8                           !施加全局加速度
SOLVE                                   !求解

TIMINT，ON                              !打开瞬态效应
TIM=0                                   !定义时间初始值
DELT=1                                  !

*DO，I，1，114，1.000                   !循环控制
TIM=TIM+1                               !定义当前步的时间
TIME，TIM                               !
FDELE，ALL，ALL                         !删除上一步的载荷
ALLSEL                                  !

NSEL，S，LOC，X，-61+(I-1)              !选择加载点
NSEL，R，LOC，Y，17                     !
NSEL，R，LOC，Z，-20                    !
F，ALL，FY，-F                          !施加集中力
ALLSEL                                  !

NSEL，S，LOC，X，-53+(I-1)              !选择加载点
NSEL，R，LOC，Y，17                     !
NSEL，R，LOC，Z，-20                    !
F，ALL，FY，-F                          !施加集中力
ALLSEL                                  !
```

```
NSEL，S，LOC，X，-61+(I-1)            !选择加载点
NSEL，R，LOC，Y，17                   !
NSEL，R，LOC，Z，20                   !
F，ALL，FY，-F                        !施加集中力
ALLSEL                                !

NSEL，S，LOC，X，-53+(I-1)            !选择加载点
NSEL，R，LOC，Y，17                   !
NSEL，R，LOC，Z，20                   !
F，ALL，FY，-F                        !施加集中力
ALLSEL                                !

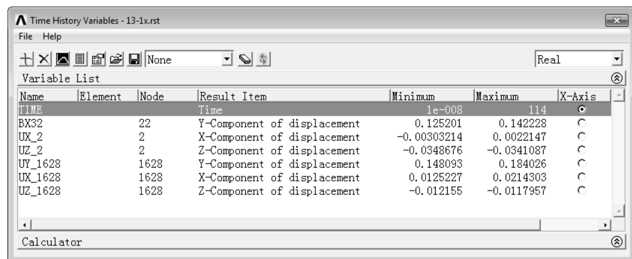
NSUBST，1                             !子步数为 1
OUTRES，ALL，ALL                      !全部输出
SOLVE                                 !求解
*ENDDO                                !循环结束
                                      !
FINI                                  !
```

完成求解即可以进行后处理。

6）在 GUI 界面中的命令输入框中输入如下命令，并按〈Enter〉键。

```
/POST26                               !进入进间历程后处理器
NSOL，2，22，U，Y，BX32               !22 号节点 Y 方向位移曲线
NSOL，3，2，U，X，UX_2                !2 号节点 X 方向位移曲线
NSOL，4，2，U，Z，UZ_2                !2 号节点 Z 方向位移曲线
NSOL，5，1628，U，Y，UY_1628          !1628 号节点 Y 方向位移曲线
NSOL，6，1628，U，X，UX_1628          ! 1628 号节点 X 方向位移曲线
NSOL，7，1628，U，Z，UZ_1628          ! 1628 号节点 Z 方向位移曲线
```

在 GUI 界面中选择 Main Menu>TimeHistPostPro 命令，弹出图 12-64 所示的变量查看器，列出了上述命令所定义的曲线。



Name	Element	Node	Result Item	Minimum	Maximum	X-Axis
TIME			Time	1e-008	114	⊙
BX32		22	Y-Component of displacement	0.125201	0.142228	○
UX_2		2	X-Component of displacement	-0.00303214	0.0022147	○
UZ_2		2	Z-Component of displacement	-0.0348676	-0.0341087	○
UY_1628		1628	Y-Component of displacement	0.148093	0.184026	○
UX_1628		1628	X-Component of displacement	0.0125227	0.0214303	○
UZ_1628		1628	Z-Component of displacement	-0.012155	-0.0117957	○

图 12-64　变量查看器

选择第一个变量 BX_32，单击变量查看器中的绘制曲线按钮，工作区中绘制的曲线如图 12-65 所示。

同样的方法可以绘制出 2 号节点 X 方向位移曲线，如图 12-66 所示。

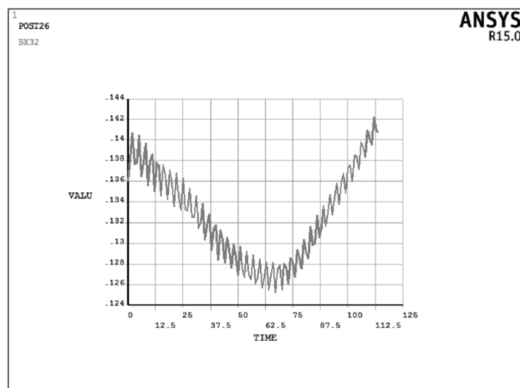


图 12-65　22 号节点 Y 方向位移曲线

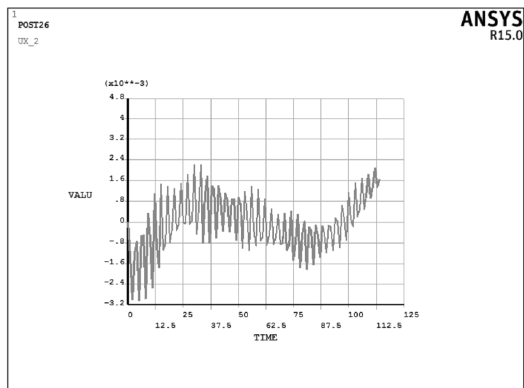


图 12-66　2 号节点 X 方向位移曲线

2 号节点 Z 方向位移曲线如图 12-67 所示，1628 号节点 Y 方向位移曲线如图 12-68 所示。

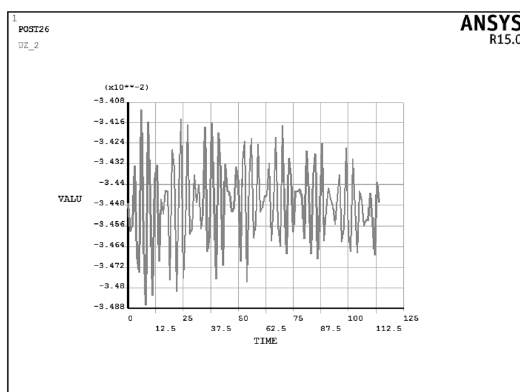


图 12-67　2 号节点 Z 方向位移曲线

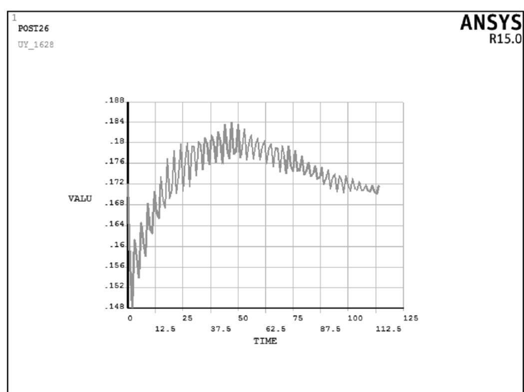


图 12-68　1628 号节点 Y 方向位移曲线

1628 号节点 X 方向位移曲线如图 12-69 所示，1628 号节点 Z 方向位移曲线如图 12-70 所示。

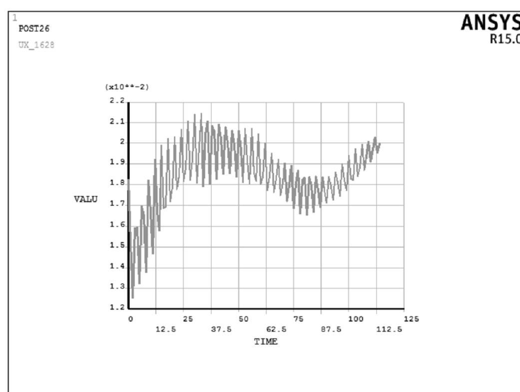


图 12-69　1628 号节点 X 方向位移曲线

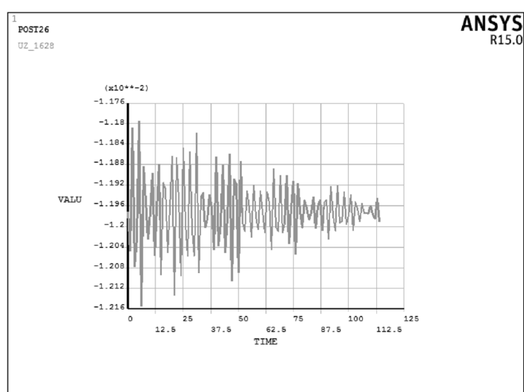


图 12-70　1628 号节点 Z 方向位移曲线

7）在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 12-71 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。

选择位移矢量和，如图 12-71 所示，单击 OK 按钮，显示初始位移云图如图 12-72 所示。

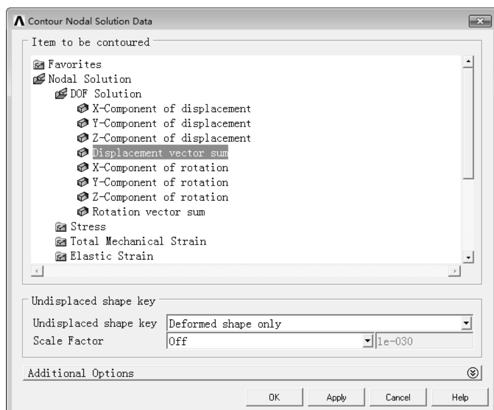


图 12-71 Contour Nodal Solution Data 对话框

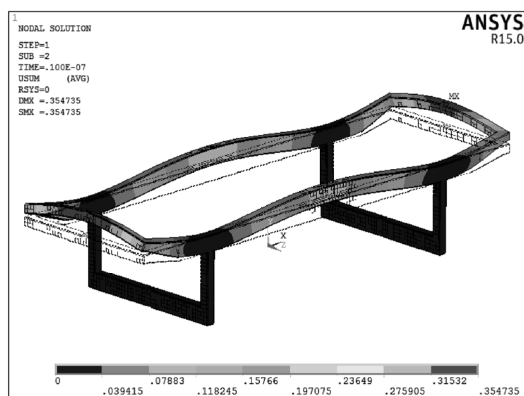


图 12-72 初始位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Read Results>Next Set 命令，依次读取其后四阶结果，显示各时期位移云图如图 12-73～图 12-76 所示。

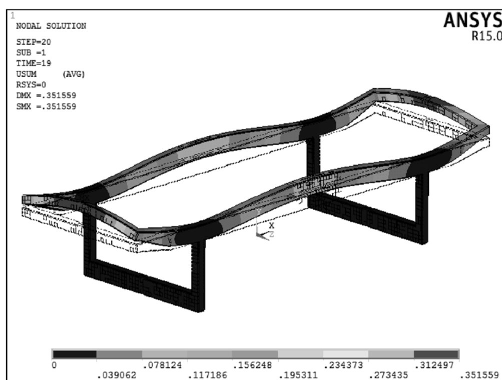


图 12-73 第 20 步位移云图

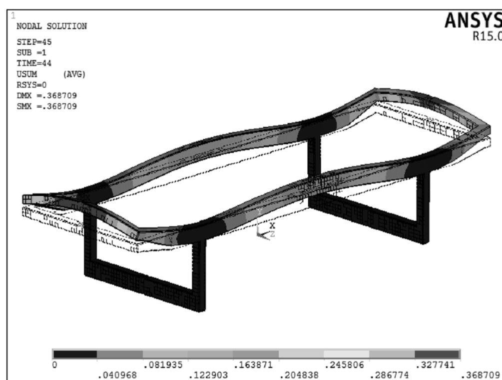


图 12-74 第 45 步位移云图

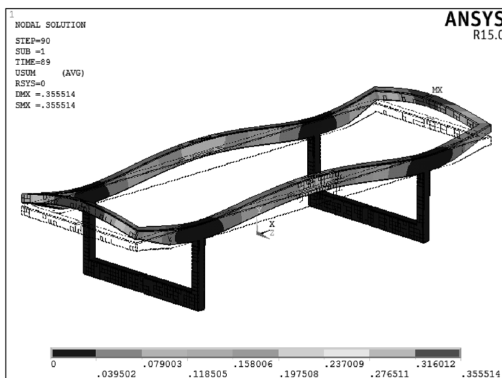


图 12-75 第 90 步位移云图

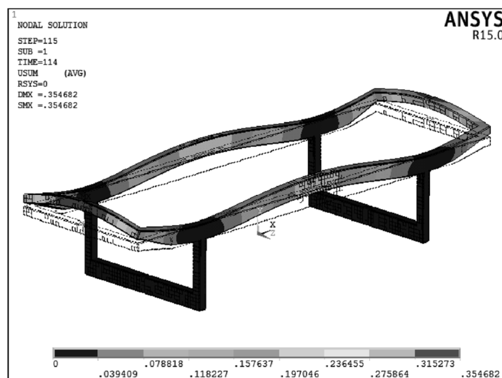


图 12-76 第 115 步位移云图

8）在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 12-77 所示的 Contour Nodal Solution Data 对话框。选择第一主应力单击 OK 按钮，显示初始状态应力如图 12-78 所示。

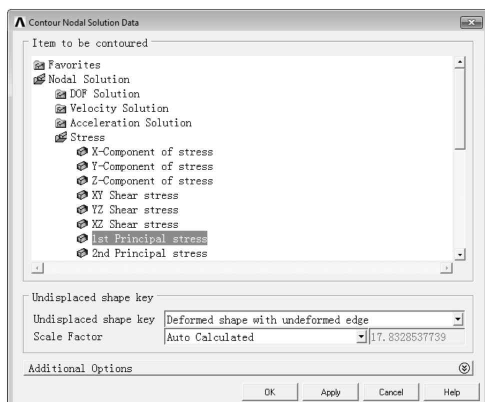


图 12-77　Contour Nodal Solution Data 对话框

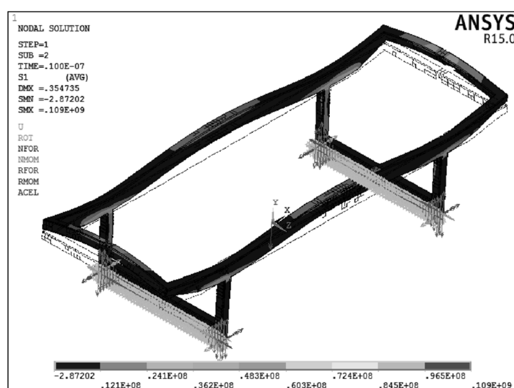


图 12-78　初始应力云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Read Results>Next Set 命令，依次读取其后各阶结果，显示各时期位主应力云图如图 12-79～图 12-82 所示。

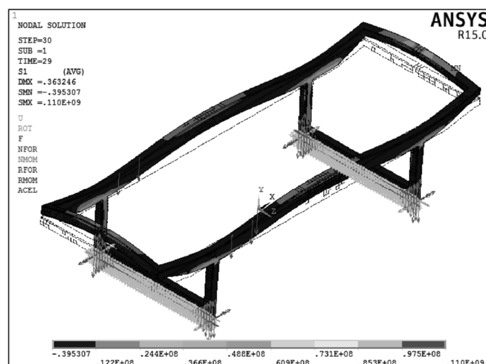


图 12-79　第 30 步应力云图

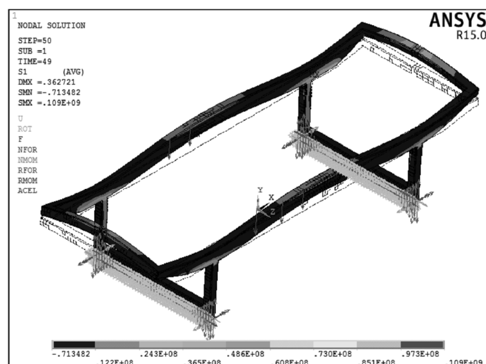


图 12-80　第 50 步应力云图

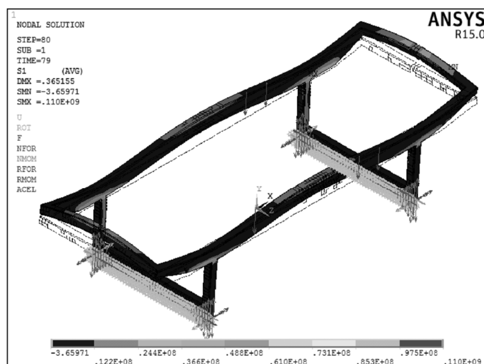


图 12-81　第 80 步应力云图

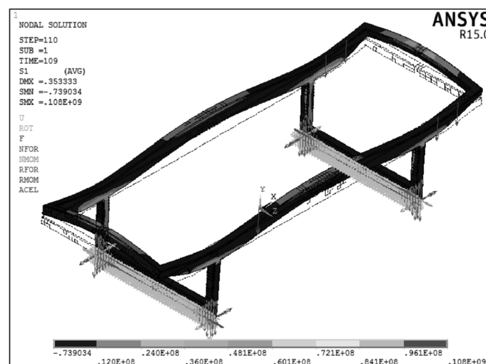


图 12-82　第 110 步应力云图

12.2.3 模态分析

1）下面进行模态求解。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 命令，弹出图 12-83 所示的 New Analysis 对话框，选择分析类型为 Modal，即模态分析。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 命令，弹出图 12-84 所示的 Modal Analysis 对话框，设置如图 12-84 所示，单击 OK 按钮。

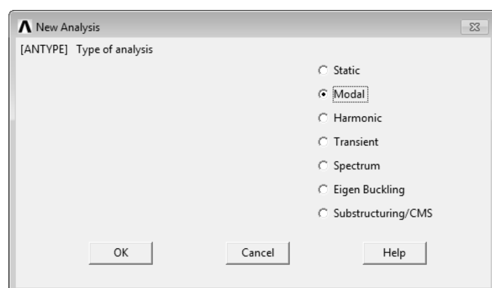


图 12-83　New Analysis 对话框

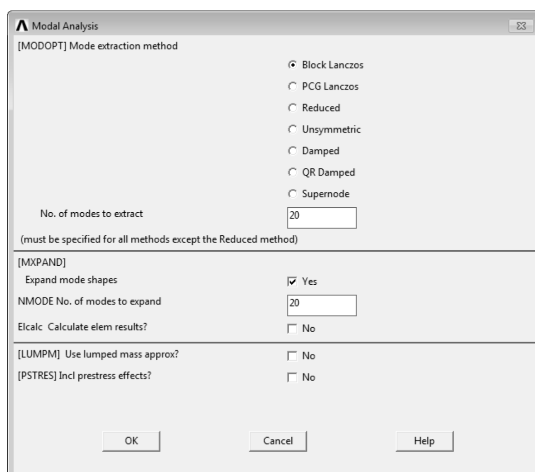


图 12-84　Modal Analysis 对话框

2）在 GUI 界面中选择 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 命令，单击 OK 按钮开始求解，当弹出 Solution is done!提示时，求解完成。

3）求解完成后，在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Results Summary 命令，弹出图 12-85 所示的 Results Summary 窗口。

SET,LIST Command

File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	0.38312	1	1	1
2	0.38382	1	2	2
3	0.45333	1	3	3
4	0.45527	1	4	4
5	0.58396	1	5	5
6	0.60009	1	6	6
7	0.70982	1	7	7
8	0.76484	1	8	8
9	0.84988	1	9	9
10	0.95672	1	10	10
11	1.0923	1	11	11
12	1.1107	1	12	12
13	1.3656	1	13	13
14	1.4201	1	14	14
15	1.5944	1	15	15
16	1.8174	1	16	16
17	1.9402	1	17	17
18	2.0641	1	18	18
19	2.2729	1	19	19
20	2.5159	1	20	20

图 12-85　前二十阶固有频率

在弹出图 12-85 所示的 SET.LIST Command 窗口中，显示的网架的前二十阶固有频率。

在 GUI 界面中选择 Main Menu>General Postproc> Read Results> First Set 命令，读入第一阶的结果。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Contour Plot> Nodal Solu 命令，弹出图 12-86 所示的 Contour Noda1 Solution Data 对话框。选择位移矢量和单击 OK 按钮，显示第一阶振型云图如图 12-87 所示。

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Read Results>Next Set 命令，读取其后各阶结果，显示各阶振型位移云图如图 12-88～图 12-91 所示。

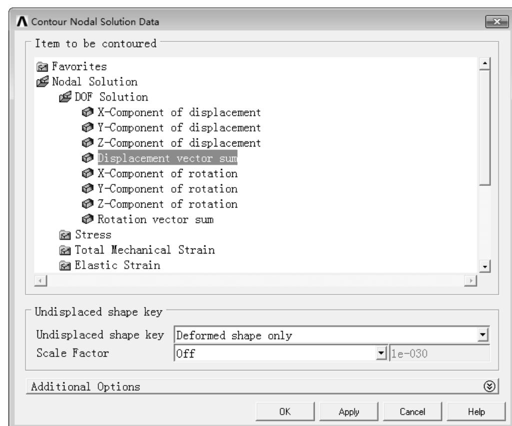


图 12-86　Contour Nodal Solution Data 对话框

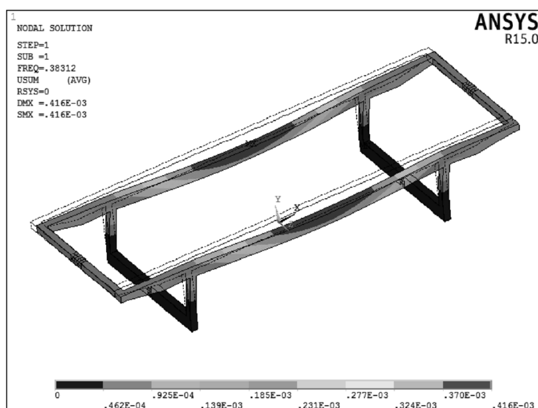


图 12-87　第一阶振型位移云图

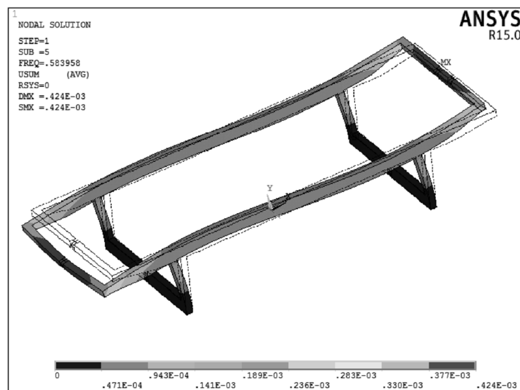


图 12-88　第五阶振型位移云图

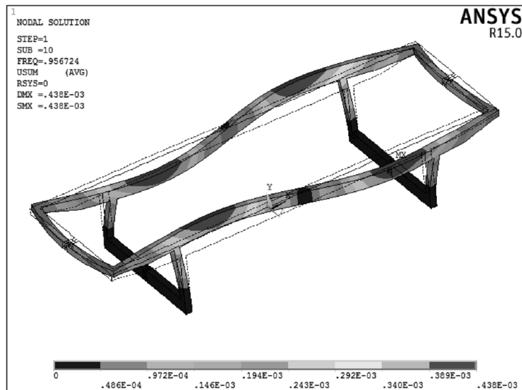


图 12-89　第十阶振型位移云图

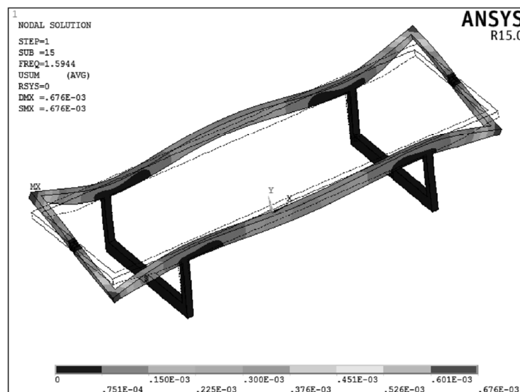


图 12-90　第十五阶振型位移云图

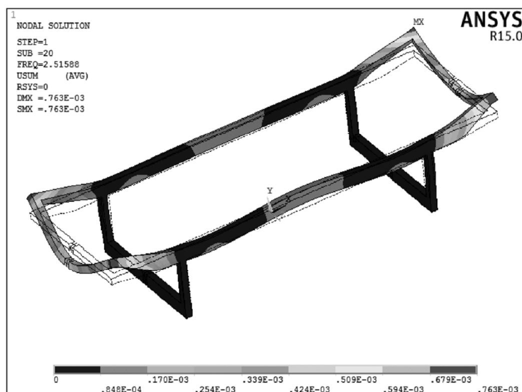


图 12-91　第二十阶振型位移云图

在 GUI 界面中选择 Main Menu> General Postproc> Plot Results> Vector Plot> Predefined 命令，弹出图 12-92 所示的 Vector Plot of Predefined Vectors 对话框。选择平移位移矢量，显示第一阶振型矢量图如图 12-93 所示。

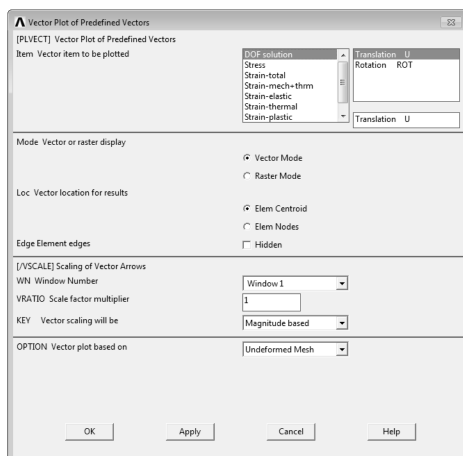


图 12-92　Vector Plot of　Predefined Vectors 对话框

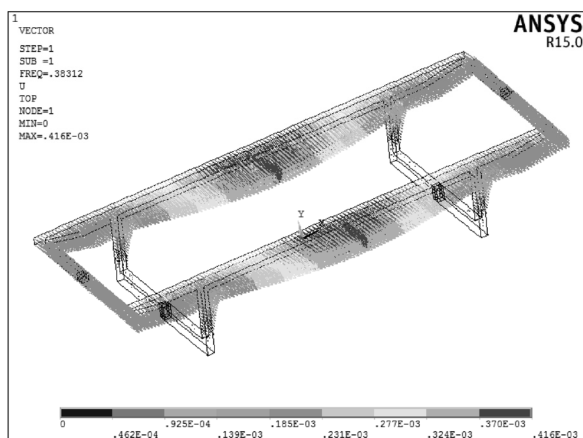


图 12-93　第一阶振型位移矢量图

读取其后各阶结果，显示各阶振型位移矢量图如图 12-94～图 12-97 所示。

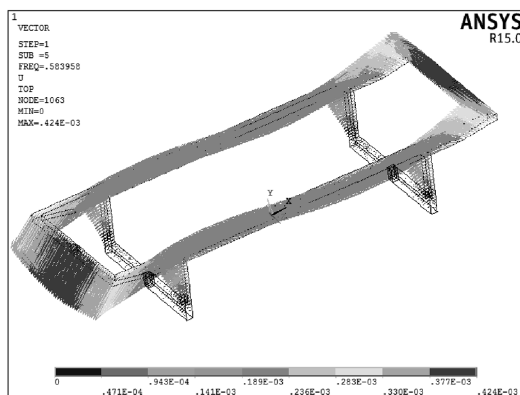


图 12-94　第五阶振型位移矢量图

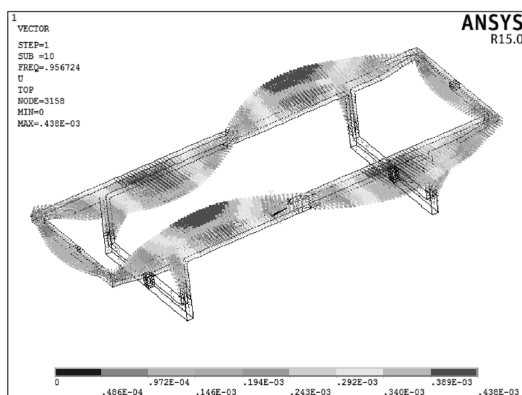


图 12-95　第十阶振型位移矢量图

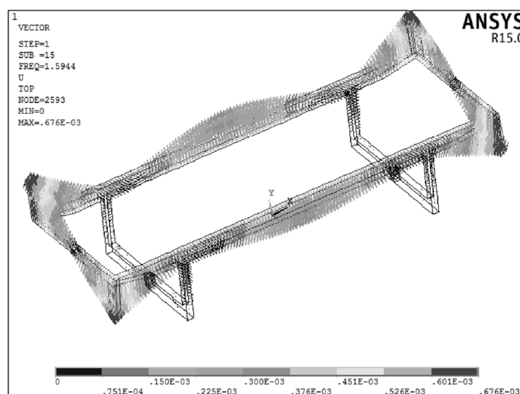


图 12-96　第十五阶振型位移矢量图

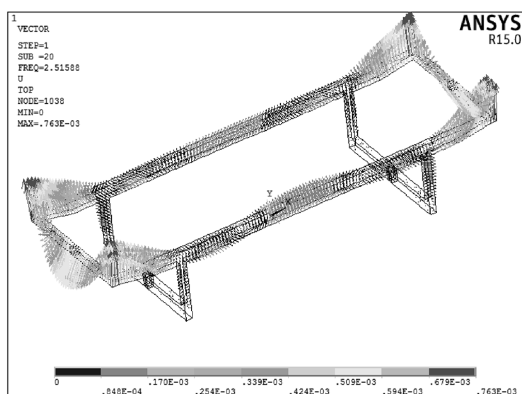


图 12-97　第二十阶振型位移矢量图

在通用菜单中选择 PlotCtrls> Animate> Mode Shape 命令，弹出图 12-98 所示的 Animate

Mode Shape 对话框。

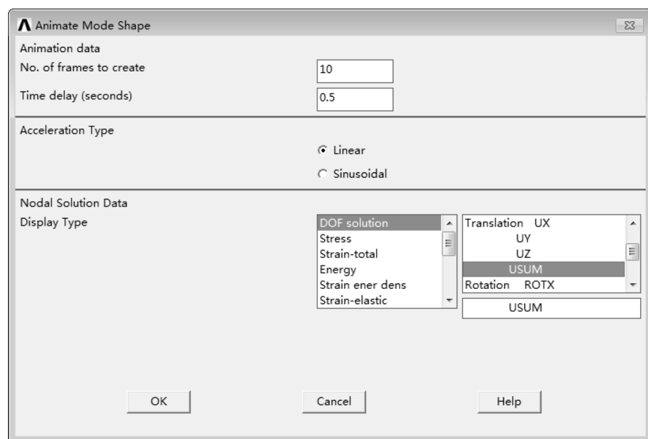


图 12-98 Animate Mode Shape 对话框

选择 USUM，单击 OK 按钮，即可以在工作区中运行动画仿真。

单击工具栏中的 QUIT 按钮，弹出 Exit from ANSYS 对话框。

选择 Save Everything，保存所有项目，单击 OK 按钮退出 ANSYS。

12.3 本章小结

本章以起重机这一大型机械设备为例，全面讲解了实际问题中静力学分析与动学分析相结合、GUI 操作与命令流相结合等多种分析技术融合的分析过程。

在复杂的分析项目中，希望读者不要拘泥于选择某一技术或方法进行分析，强行套用某些分析思想进行分析往往得不到合理的结果，多种技术融会贯通，多种思想取长补短，才能得到理想的效果。

第 3 篇

土木工程应用篇

本篇第 13 章钢筋混凝土基本问题分析，从不同角度各举了一个典型的工程实例。从钢筋混凝土构件的角度出发，主要列举了钢筋混凝土板的实例。其余如梁、柱等构件的分析，其分析步骤均可参考此例。本章随后又从混凝土受力构件正常使用极限状态分析的角度出发，给出了开裂分析的实例，从混凝土工艺的角度给出了预应力混凝土的仿真方法。

第 14 章钢结构及钢筋混凝土结构分析，列举了建筑与土木工程中最典型的两种材料体系，以帮助用户熟悉其建模及分析方法。

第 15 章膜结构及网壳结构分析，列举了两种在大跨度公共建筑中比较常用的结构体系，其重点和难点在于复杂建模。其中提及的结构找形分析是处理这类问题的一个重点。

第 16 章基础工程分析，列举了基础工程中最基本的两种基础形式，其重点在于讲解软件在基础工程中应用方法，以及接触单元这一特殊单元的应用。

第 17 章桥梁工程实例分析和第 18 章隧道工程实例分析，涉及 ANSYS 在土木工程中最常见的应用领域。二者重点都在于利用生死单元的施工过程模拟方法，以及地震作用下的动力响应分析方法。

在本篇各章节中，每个实例及其分析方法都最大可能地代表 ANSYS 的多种分析功能，以提高用户应用 ANSYS 软件进行分析的能力。

第 13 章　钢筋混凝土基本问题分析

钢筋混凝土在工程上常被简称为钢筋砼，是指通过在混凝土中加入钢筋与之共同工作来改善混凝土力学性质的一种组合材料。钢筋混凝土是当今最主要的建筑材料之一。

本章对钢筋混凝土板及混凝土的开裂性能，预应力钢筋混凝土进行建模分析。

本章学习目标

- 掌握钢筋混凝土问题的常用单元类型。
- 掌握钢筋混凝土板的建模方法。
- 掌握钢筋混凝土开裂问题的分析方法。
- 掌握预应力的添加思路。

13.1　钢筋混凝土板

钢筋混凝土板是钢筋混凝土最基本的构件之一。钢筋混凝土板同时也是大多数钢筋混凝土工程结构体的主要构件。本节对其进行静力分析。

13.1.1　问题简述

有一 2m×1m 的混凝土板，厚为 180mm。沿长度方向均布 4 个ϕ100mm 的圆洞。板两长端支撑。

混凝土板几何模型示意如图 13-1 所示。

本例采用 SOLID65 单元作为混凝土材料。

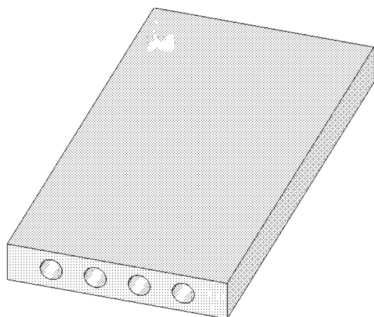


图 13-1　混凝土板几何模型示意图

13.1.2　前处理

单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮后选择 Sructural 选项。

为了方便读者，会给出详尽的 GUI 操作路径及设置方法，并且会在相应步骤给出 APDL

的命令流。

（1）选择单元类型

本例混凝土采用钢筋混凝土工程中最为常用的 SOLID65 单元，设置路径如下。

GUI：Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete。

通过以上路径，打开单元设置对话框。单击 Add 按钮，选择 concrete 65。单击 OK 按钮完成单元类型的添加，并关闭对话框。

相应的命令流：

```
ET，1，SOLID65
```

（2）设置材料属性

为模型材料设置材料属性路径如下。

GUI: Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models。

在打开的对话框中，通过 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic，设置弹性模量。混凝土材料弹性模量 EX=21e3，泊松比μ=0.2。

依次展开 Material Models Available>Structural> Nonlinear>Inelastic>Non-metal Plastic> Concrete，在如图 13-2 所示所示对话框中，依次输入 0.35，1，3.1125，-1，单击 OK 按钮完成设置。

在 Material Models Available>Structural> Nonlinear>Inelastic>Rate Independent>Isotropic Hardening Plasticity> Mises Plasticity>Blinear 中定义双线性材料属性，在 Yield Stss 中输入 360，在 Tang Mod 输入 20000。

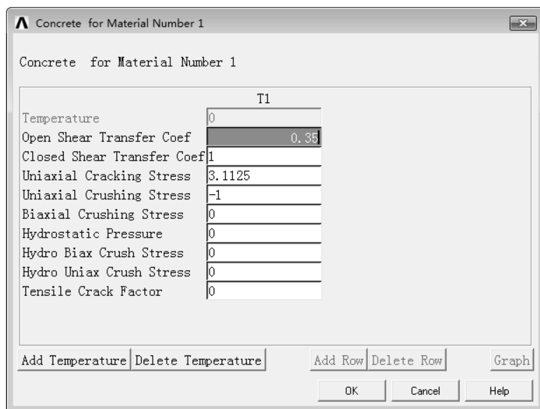


图 13-2 设置混凝土材料特性

相应的命令流：

```
MP，EX，1，21000
MP，PRXY，1，0.2
TB，CONC，1，1，9
TBDATA，，0.35，1，3.1125，-1
```

（3）建立几何模型

本例模型形式较为简单，混凝土板为一扁平长方体。其中空部分为 4 个圆柱体。

生成板：通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions，进行混凝土矩形板的生成。如图 13-3 所示，在 X 坐标范围内输入 X1=0，X2=1000；相应的，Y1=0，Y2=180；Z1=0，Z2=2000。单击 OK 按钮得到长方体，如图 13-4 所示。

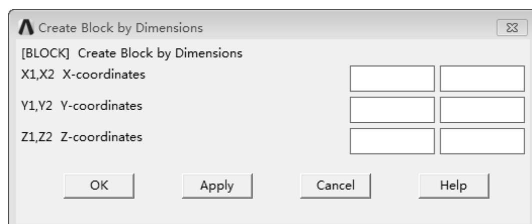


图 13-3　通过维度生成块体

生成矩形的命令流为：

```
BLC4,,，1000，180，2000
```

生成 4 个圆柱体：通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Cylinderk>Solid Cylinder 进行板中圆柱体的生成。

按照上述路径打开的对话框中，输入柱底圆心坐标 WP X=200，WP Y=90，半径 Radius=50，Depth=2000。单击 Apply 按钮生成第一根圆柱。

同样的方法，依次输入柱底圆心坐标 WP X=400，WP Y=90，半径 Radius=50，Depth=2000。单击 Apply 按钮生成第二根圆柱。输入柱底圆心坐标 WP X=600，WP Y=90，半径 Radius=50，Depth=2000。单击 Apply 按钮生成第三根圆柱。输入柱底圆心坐标 WP X=800，WP Y=90，半径 Radius=50，Depth=2000。单击 OK 按钮生成第四根圆柱。生成结果如图 13-5 所示。

生成圆柱的命令流如下：

```
CYL4，200，90，50,,,，2000
CYL4，400，90，50,,,，2000
CYL4，600，90，50,,,，2000
CYL4，800，90，50,,,，2000
```

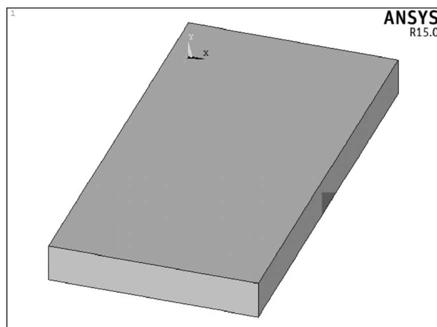


图 13-4　生成板的几何模型

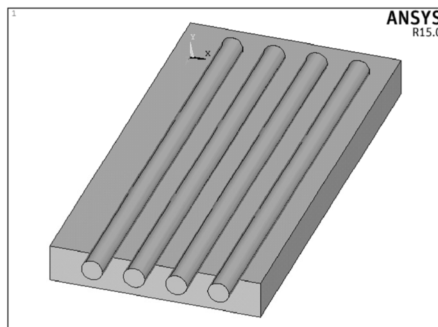


图 13-5　圆柱和板的几何模型

进行布尔运算，生成板中圆洞，路径如下。

GUI：Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Subtract>Volumes。首先拾

取体 1，即长方体。然后拾取 4 根圆柱，或选择 pick all。单击 OK 按钮完成布尔运算，得到最后的几何模型，如图 13-6 所示。正面视图如图 13-7 所示。

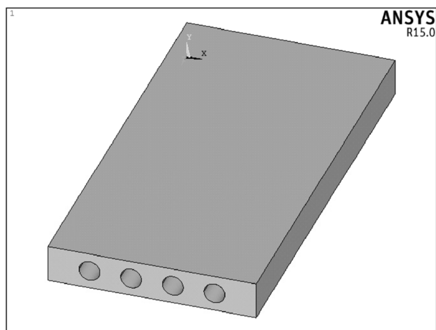


图 13-6 带洞板

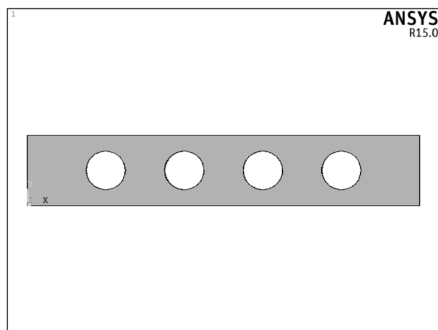


图 13-7 带洞板正面视图

注意：在布尔运算的减法运算中，选择剪除对象为 pick all 时，所代表的意思是，从上一步拾取的体中减去除去其以外的其他所有体。

减法布尔运算命令流为：

VSBV，1，ALL

（4）网格划分

拾取模型边线，通过对此边线划分来控制整个模型的单元尺寸。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>Picked Lines 拾取长边各线，设置单元长度 SIZE 为 25，即每段 25mm；拾取各短边，设置为 25；拾取板厚方向直线，设为 30。设置效果如图 13-8 所示。

设置完毕，对模型赋属性。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Volumes 拾取板，单击 OK 按钮，弹出属性 VolumeAttributes，设定单元类型，实常数和材料号均为 1，其余按默认设置即可。

设定完毕，执行路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volume Sweep>Sweep 拾取板体，系统会沿着板长方向进行扫掠划分。完成网格划分后的效果如图 13-9 所示。

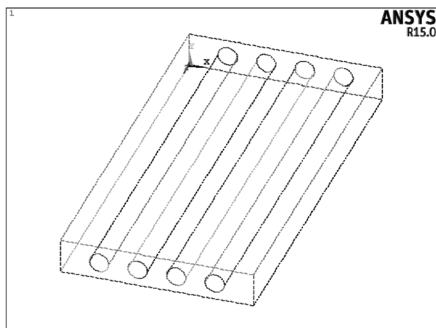


图 13-8 控制网格尺寸

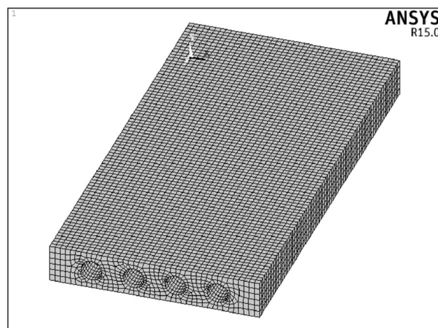


图 13-9 网格划分后

本阶段命令流：

```
/REPLOT                                   !重新显示图像
!网格划分
!拾取板长方向直线，并设置单元尺寸
LSEL，S，LOC，Z，1000
LESIZE，ALL，25，，
LSEL，ALL
!拾取板短边方向直线，并设置单元尺寸
LSEL，S，LOC，X，500
LESIZE，ALL，25，，
LSEL，ALL
!拾取板厚边方向直线，并设置单元尺寸
LSEL，S，LOC，Y，90
LESIZE，ALL，30，，
VSEL，ALL                                 !选择板
VATT，1，1，1                             !为板赋属性
VSWEEP，ALL                               !扫掠划分板
FINISH                                    !结束
```

13.1.3 加载及求解

（1）施加约束

进入求解模块，对模型底面 Z=1900～2000 范围内节点施加 UY 约束。对 Z=0～100 施加所有自由度的约束。

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，依靠 Location 功能选取 Z=0～100 范围的节点。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，在弹出的对话框中选择 pick all，单击 Apply 按钮，弹出如图 13-10 所示对话框。选择 All DOF 选项完成对所有自由度的约束。单击 OK 按钮关闭对话框。

```
/SOLU                                     !进入求解模块
!通过定位选择节点集
NSEL，S，LOC，Z，0，100                   !选择位于 Z=0，100 的节点
NSEL，R，LOC，Y，0                        !再筛选出其中 Y=0 位置的节点
!约束自由度
D，ALL，ALL，                             !约束全部自由度
ALLSEL，ALL                               !选择所有对象
```

同样的方式通过路径 Utility Menu>Select>Entities，依靠 Location 功能选取 Z=1900～2000 范围的节点。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，在弹出的对话框中，选择 pick all，单击 Apply 按钮，弹出图 13-10 所示对话框。选择 UY 完成对 Y 方向自由度的约束。单击 OK 按钮关闭对话框。

相应的命令流如下：

```
NSEL，S，LOC，Z，1900，2000            !定位选择节点集
NSEL，R，LOC，Y，0
D，ALL，UY                              !约束 Y 向自由度
NSEL，ALL
```

约束效果如图 13-11 所示。

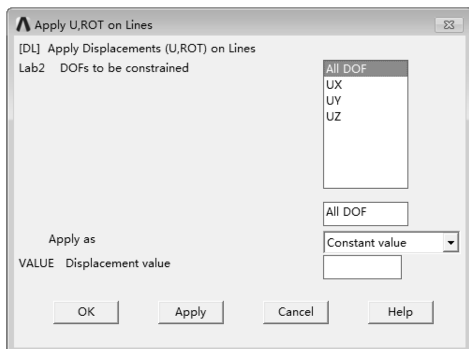


图 13-10 设置自由度

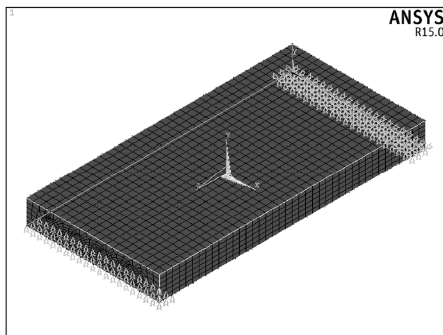


图 13-11 约束后的模型

（2）施加荷载

本例以施加节点位移作为加载条件。

通过路径 Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes，拾取板的正中点，施加荷载 FY=-8000。加载模型如图 13-12 所示。

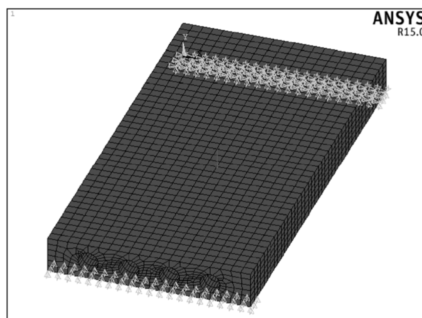


图 13-12 加载与约束模型

用命令流形式进行加载，如下：

```
!定位施加荷载点
NSEL，S，LOC，Z，1000
NSEL，R，LOC，Y，180
NSEL，R，LOC，X，500
!施加竖向荷载
F，ALL，FY，-8000
```

（3）设置求解项

设置分析选项。选择路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Basic，打开 Solution Controls 对话框，如图 13-13 所示。

在 Analysis Options 下拉菜单中打开大变形。在 Time Control 中，设置加载子步数为100，在右侧的结果输出控制中将输出频率设置为 Write Every Substep。

```
NLGEOM，ON     !打开大变形
NSUBST，100    !荷载子步数 100
```

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Nonlinear，得到对话框如图 13-14 所示。

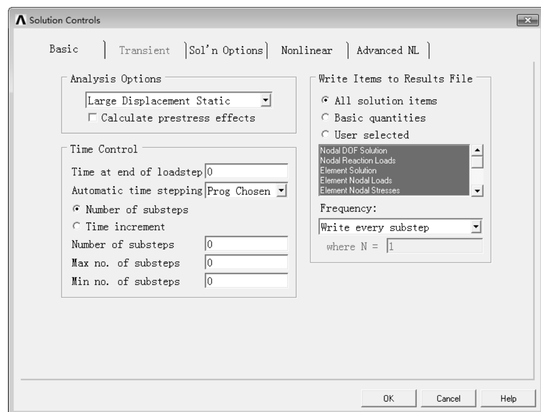


图 13-13　Solution Controls 对话框（Basic 选项卡）

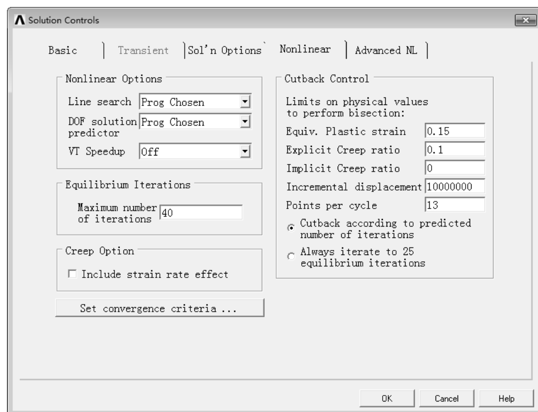


图 13-14　Solution Controls 对话框（Nonlinear 选项卡）

设置最大循环次数为 40。单击 Set Convergence Criteria 按钮，在弹出的对话框中单击 Replace 按钮，将非线性收敛准则 Nonlinear Convergence Criteria 的 Tolerance About Value 值设为 0.05。单击 OK 按钮完成设置。

```
OUTRES，ALL，ALL          !设置输出频率
NEQIT，40                 !迭代次数
PRED，ON
CNVTOL，F，，0.05，1      !设置收敛标准
```

（4）求解

选择所有元素：Utility Menu>Select>Everything。

求解：Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

13.1.4 后处理

（1）结构变形

求解结束后，可得到结构竖向变形云图，路径为 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape。Y 方向云图如图 13-15 所示。

命令流：

```
/POST1                  !进入一般后处理模块
PLNSOL，U，Y，0，1      !画 Y 方向变形
PLNSOL，S，1，0，1      !第一主应力
```

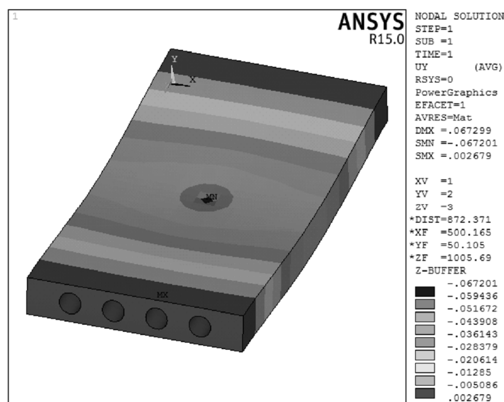


图 13-15 Y 方向变形云图

（2）第一主应力分布

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，查看第一主应力分布，如图 13-16 所示。

为了更清楚地看到板内部的主应力的分布情况，可以进行设置，使图像只显示等值线。

通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Device Options，勾选 Vector Mode，再进行第一主应力分布的绘制，可得等值线图，如图 13-17 所示。

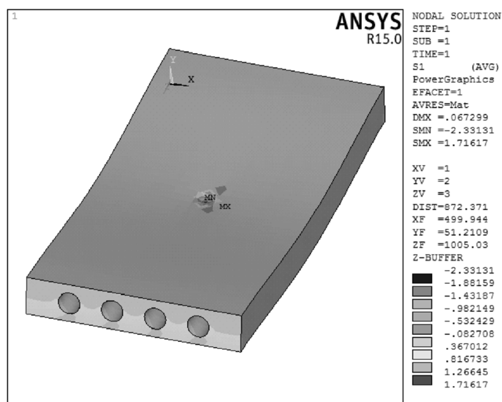


图 13-16 第一主应力云图

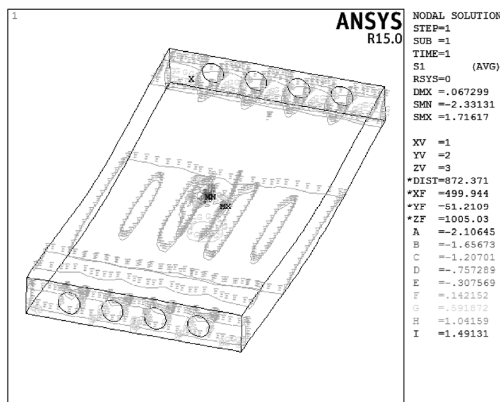


图 13-17 第一主应力等值线

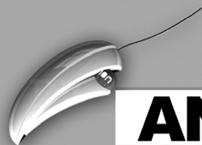
命令流：

```
/DEVICE，VECTOR，1
PLNSOL，S，1，0，1
```

同样，这时再查看板的变形情况，也是以等值线方式显示的，如图 13-18 所示。

命令流：

```
PLNSOL，U，Y，0，1
```



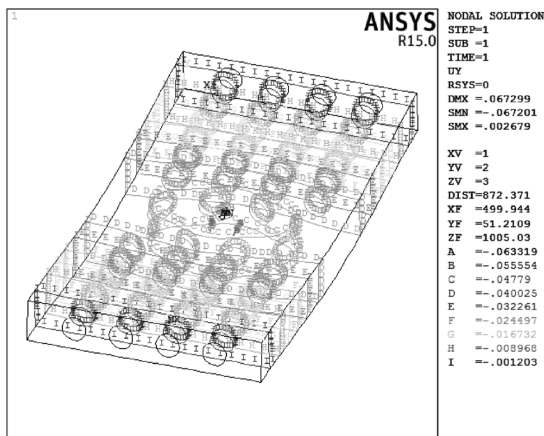


图 13-18　板的变形等值线

（3）等效应力分布情况

通过路径 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 可以定义单元表。

执行上述路径，定义单元表 NMISC，5 为 seqv_i，即预定好了一个单元表。具体方法如下。

首先通过路径 Utility Menu>Select>Entities 选择板单元为当前有效单元。

定义单元表，打开路径 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table，弹出对话框，单击 Add 按钮，添加单元表。定义 Lab 为 seqv_i，Item 选择 By sequence num 选项，Comp 选择 NMISC，5。

再通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Elem Table 绘制该单元表。

相关对话框如图 13-19 和图 13-20 所示。

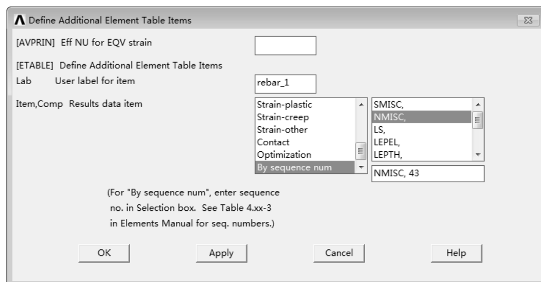


图 13-19　定义钢筋平均等效应力单元表

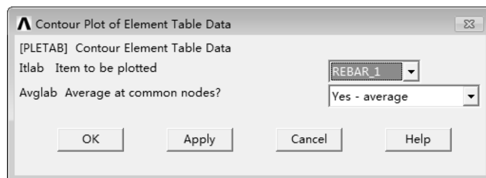


图 13-20　绘制单元表数据

得到 SOLID 单元节点 I 的等效应力分布，如图 13-21 所示。

此处命令流较复杂，如下：

```
ETABLE，SEQV_I，NMISC，5
PLETAB，SEQV_I，AVG
```

（4）查看应变状态

通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Device Options，取消勾选 Vector Mode，可以重新恢复计算结果的云图视图显示。

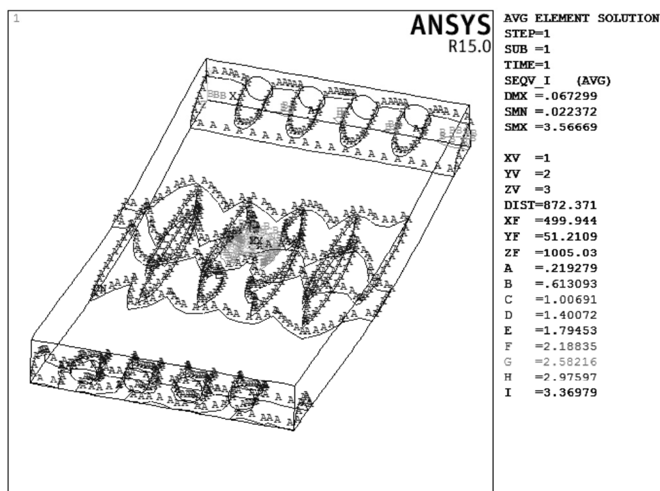


图 13-21 等效应力分布图

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，在打开的对话框中选择 Total mechanical strain，可以查看相应的应变状态。

命令流：

```
/DEVICE，VECTOR，0
PLNSOL，EPTO，1，0，1.0
PLNSOL，EPTO，INT，0，1.0              !关闭等值线显示
/DEVICE，VECTOR，1                     !第一主应变
PLNSOL，EPTO，1，0，1.0                !应变密度
PLNSOL，EPTO，INT，0，1.0
```

得到第一主应变的云图如图 13-22 所示，应变密度分布如图 13-23 所示。

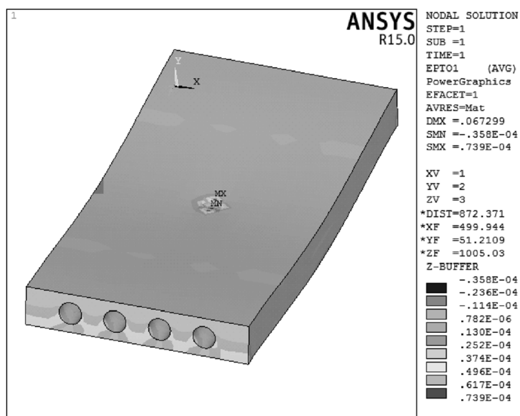


图 13-22 第一主应变云图

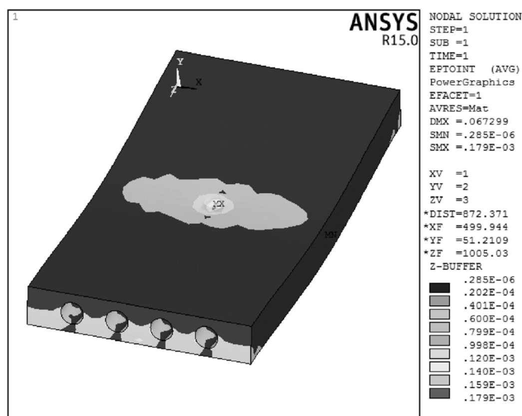


图 13-23 应变密度云图

得到第一主应变的等值线如图 13-24 所示，应变密度等值线如图 13-25 所示。

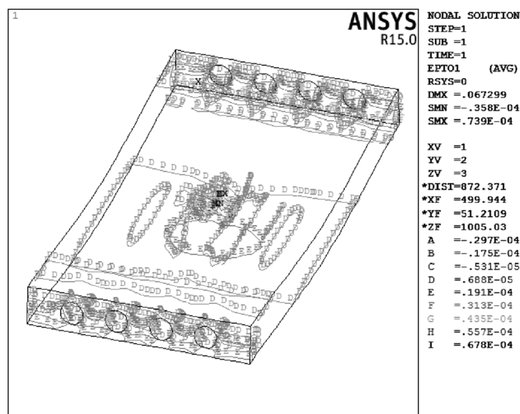


图 13-24　第一主应变等值线

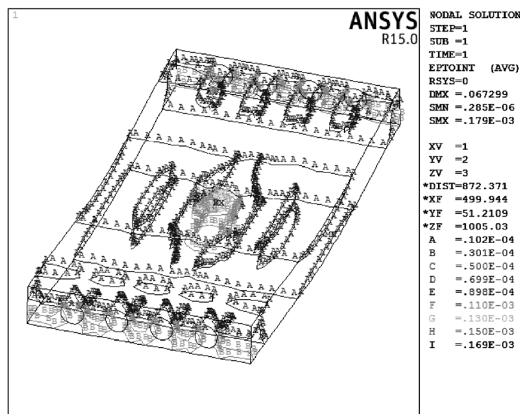


图 13-25　应变密度等值线

13.2　混凝土开裂

混凝土在张力作用下的破坏是由于最初的裂缝和裂缝在整个或部分构件中不断增长这一问题所引起的。此外，集中应力普遍存在于不规则的物质基质中；这将导致微裂缝的出现，同时随着裂缝依次连续的增长这将导致结构的破坏。

13.2.1　混凝土的裂缝模型

在钢筋混凝土结构的有限元分析中，常用的裂缝模型有以下几种：

（1）弥散（分布）裂缝模型

弥散裂缝模型，也称分布裂缝模型，其实质是将实际的混凝土裂缝“弥散”到整个单元中，将混凝土材料处理为各向异性材料，利用混凝土的材料本构模型来模拟裂缝的影响。这样，当混凝土某一单元的应力超过了开裂应力，则只需将材料本构矩阵加以调整，无须改变单元形式或重新划分单元网格，易于有限元程序实现，因此得到了非常广泛的应用。

（2）离散（分离）裂缝模型。

离散裂缝模型，也称分离式裂缝模型。分离式裂缝模型假定裂缝出现在单元边界上，将节点分离在裂缝两侧，一旦出现裂缝就增加新节点，重新划分单元，使裂缝总是处于单元和单元的边界，运用这一模型确定开裂深度时需要反复计算，其调整工作比较烦琐，对计算机的要求较高。本模型的优点是能较自然地描述裂缝的发生和扩展过程并可计算出裂缝扩展深度。

此外，当大体积混凝土产生裂缝后，缝内将渗入水压，采用分离式模型，可以在缝面上施加水压。其缺点是需预先知道裂缝的位置和走向，较难用于大体积混凝土的三维开裂分析。

（3）断裂力学模型

断裂力学模型主要考虑裂缝尖端应力集中对裂缝扩展的影响，它需要预先知道裂缝的位置，多用于混凝土结构裂缝扩展条件的分析和其他开裂问题中。

13.2.2 分析中用到的概念

（1）SOLID65 单元

ANSYS 中的 SOLID65 单元是专为混凝土、岩石等抗压能力远大于抗拉能力的非均匀材料开发的单元，可以模拟材料的拉裂和压溃现象，能够使混凝土材料具有开裂、压碎、塑性变形和蠕变的能力。

（2）分析中所作的假设

本例采用分布式裂缝模型。在分析中做如下假设：

- 梁受弯矩作用发生变形，截面上的混凝土、钢筋等应变均符合平截面假定。
- 钢筋与混凝土无相对滑移，变形协调。
- 混凝土只能受压。

（3）应力释放

在进行开裂模拟时，要用到应力释放。所谓应力释放（Stress Relief），是指物体内某一点的应力由于释放能量而降低的现象；确切地说是能量释放。受压开裂时，混凝土材料完全崩裂，应力骤然降为零。受拉破坏时，在垂直于裂缝的方向上应力骤然降为零。采取应力释放，即可区分混凝土是受压开裂还是受拉开裂。ANSYS 中有专门的应力释放控制件。

13.2.3 问题描述

在本例中，单位均与 mm，N 的单位相适应，弯矩为 N • mm，弹性模量单位 MPa。

（1）几何参数

本例截取一段矩形截面钢筋混凝土梁。

截面尺寸高 600，宽 450，段长 150。

混凝土梁段截面几何图如图 13-26 所示。

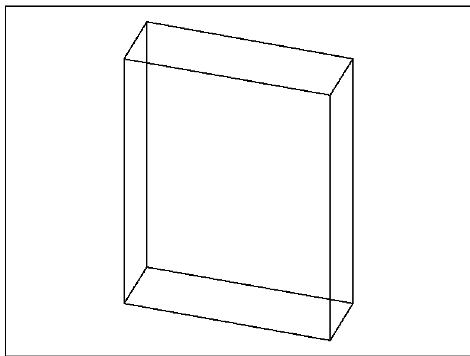


图 13-26　混凝土梁段截面图

（2）材料性能

混凝土，EX=20E3，μ=0；

钢筋选用ϕ12，其截面积=12×12×PI/4= 113.1。

钢筋，EX=300E3，μ=0.3。

（3）受力情况

梁段所受弯矩 M=600E3。

13.2.4 前处理

（1）进入工作界面

运行 ANSYS 15.0，设置工作名 concrete cracks。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 后选择 Sructural。

（2）定义单元类型

本例共 3 种单元类型。

- 混凝土采用钢筋混凝土工程中最为常用的 SOLID65 单元。
- 钢筋采用 LINK180 单元。
- 选用 PIPE16 单元来联系约束方程区域，以便似的节点具有足够的转动空间。

设置方法如下。

通过路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，单击 Add 按钮添加单元 SOLID65 为 1 号单元；添加 LINK180 为 2 号单元。

在新版本的 ANSYS 中 PIPE16 已不在对话框中给出，用户可以在选择了 PIPE 单元后在给出的位置直接输入它的编号 16，单击 OK 按钮即可，如图 13-27 所示。

相应命令流如下：

```
/PREP7                        !进入前处理模块
ET，1，SOLID65                !定义单元 1 类型为 SOLID65
KEYOPT，1，5，2
ET，2，LINK180                !定义单元 2 类型为 LINK180
ET，3，PIPE16                 !定义单元 3 类型为 PIPE16
```

（3）设置单元选项

在 Element Types 对话框中，选择 SOLID65，单击 Options 按钮，打开 K5，选择 Nodal stress；打开 K7，选择 EXTRUDE。K7 即是之前介绍的应力释放与否的设置，设置如图 13-28 所示。

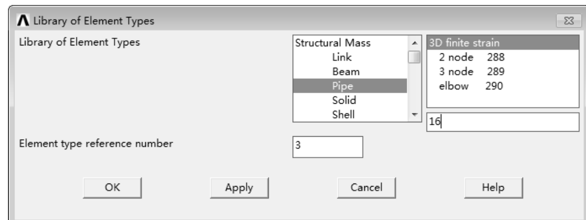


图 13-27 手动输入编号

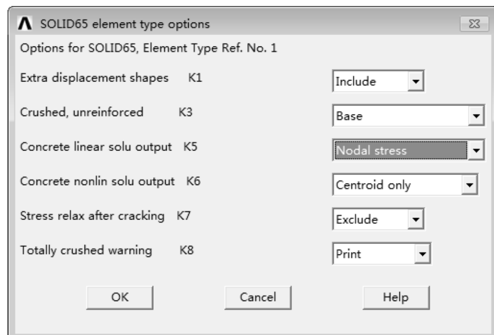


图 13-28 设置节点应力输出和应力释放

（4）定义实常数

本例需要定义 3 个实常数。

为保持材料编号统一，定义第一个实常数为空值。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete，在打开的对话框中单击 Add 按钮，选择 SOLID65，单击 OK 按钮，在实常数设定的对话框中直接单击 OK 按钮跳过。

定义 LINK180，前面路径相同，在 RealConstantset Number2，For LINK180 中，为其设置截面尺寸 AREA=113.1。单击 OK 按钮。

定义第三个实常数，在 Outerside diameter 中输入 1，在 Wall thickness 中输入 0.5，再单击 OK 按钮完成实常数设置。

```
R，1
R，2，113.1
R，3，1，0.5
```

（5）定义材料属性

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

先定义混凝土。选择对话框右侧的 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框中输入数值，混凝土 EX 为 20e3，PRXY 为 0。

通过路径 Structural> Nonlinear>Inelastic> Non-metal Plastic>Concrete，设置 Uniaxial Crushing Stress 为-1，即关闭压碎。其余保持默认。

定义钢筋的弹性模量及泊松比方法同混凝土，输入 EX 为 300e3，PRXY 为 0.3。

此处可以使用命令流操作，方便且便于修改。

命令流：

```
MP，EX，1，20E3              !定义混凝土材料
MP，PRXY，1，0
TB，CONC，1
TBDATA，，，，，-1
MP，EX，2，300E3             !定义钢筋材料
MP，PRXY，2，0.3
```

（6）建立几何模型

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Block>By 2 Corners & Z 创建长方体几何模型。在弹出的对话框中输入 Width=450，Height=600，Depth=150。单击 OK 按钮完成建模，如图 13-29 所示。

（7）划分网格

1）划分钢筋网格。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>MeshTool，单击 Element Attributes 中的 Set 进行材料特性设置，选择 TYPE 为 2。再在 Size Control 中选择 Lines Set，拾取侧边 L9 和 L10，单击 OK 按钮，在弹出的尺寸控制对话框中设置 NDIV=1，即只划分为 1 份。

选择直线及为其设置参数的命令流如下：

```
/PNUM，LINE，1                  !显示线元素编号
LSEL，S，，，9，10              !拾取线 9，10
```

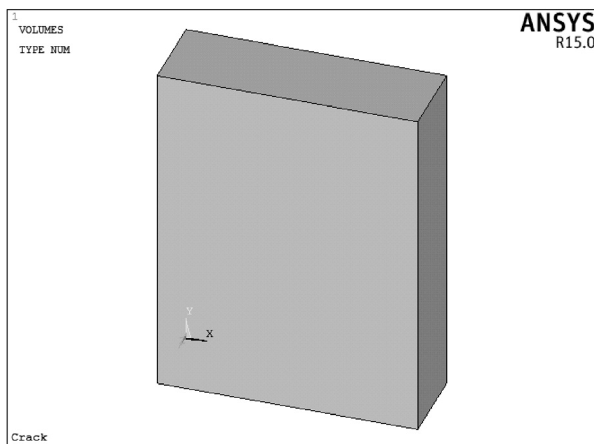


图 13-29　梁段几何模型

```
TYPE，  2                          !为当前直线赋单元类型
MAT，     2                        !为当前直线赋材料类型
REAL，     2                       !为当前直线赋实常数
LESIZE，ALL，，，1                  !控制直线划分份数
```

单击 OK 按钮完成设置，回到 MeshTool，在 Mesh 中选择 Lines，单击 Mesh 按钮完成划分。

命令流：LMESH，ALL

2）划分虚拟单元网格。

操作步骤和划分钢筋时相同，在设置材料特性时，TYPE 选为 3，MAT=1，REAL=3，单击 OK 按钮。在 Size Control 中选择 Lines Set，拾取侧边 L6 和 L8，单击 OK 按钮，在弹出的尺寸控制对话框中设置 NDIV=4。其余同上，完成划分。

3）划分体网格。

设置 TYPE 选为 1，MAT=1，REAL=1，单击 OK 按钮。

相应命令流：

```
ALLSEL
TYPE，1
MAT，1
REAL，1
```

在 Size Control 中选择 Lines Set，拾取 L4，L5，L26 和 L7，单击 OK 按钮，在弹出的尺寸控制对话框中设置 NDIV=1。

```
LSEL，S，，，4，5
LESIZE，ALL，，，1
ALLSEL
```

设置划分对象为体 Volumes，网格形状为 Hex，划分方式选择 Mapped。单击 Mesh 按钮完成划分。

划分体的命令流如下：

```
MSHAPE，0，3D
MSHKEY，1
VMESH，ALL
FINISH
```

划分后的结果如图 13-30 所示。

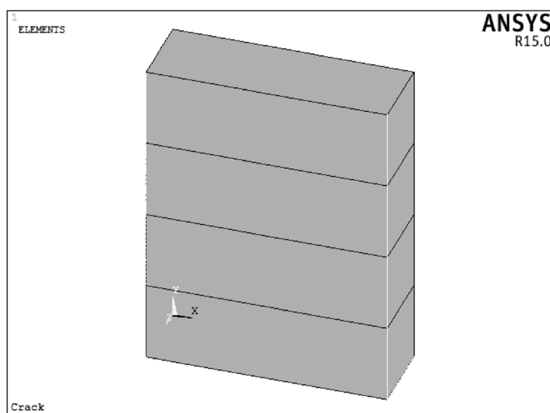


图 13-30　有限元模型

13.2.5 加载及求解

（1）建立约束方程

为了实现平截面假定，同时又使得节点能够有转动自由度，需要在截面上的节点建立约束方程。

ANSYS 中可以由用户自己添加约束方程。方法如下。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Coupling / Ceqn>Constraint Eqn，弹出 Define a Constraint Equation 对话框，如图 13-31 所示。在各输入框中输入所定义的约束及其系数即可。

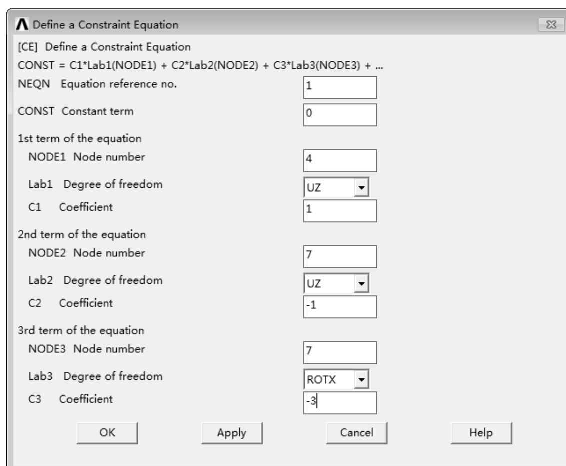


图 13-31　建立第一个约束方程

本例中，需要定义数据依次如下，只要按顺序输入对话框即可：

第 1 个方程：1，0，4，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，−3；

第 2 个方程：2，0，6，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，−1.5；

第 3 个方程：3，0，8，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，1.5；

第 4 个方程：4，0，5，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，3；

第 5 个方程：5，0，1，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，−3；

第 6 个方程：6，0，12，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，−1.5；

第 7 个方程：7，0，10，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，1.5；

第 8 个方程：8，0，9，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，3。

由于采用命令流方式，可以使用复制粘贴等操作，因此在有重复操作的部分，建议尽量使用命令流方式。相应的命令流如下：

```
/PREP7
!定义 8 个约束方程
CE，1，0，4，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，−3，
CE，2，0，6，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，−1.5，
CE，3，0，8，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，1.5，
CE，4，0，5，UZ，1，7，UZ，−1，7，ROTX，3，
CE，5，0，1，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，−3，
CE，6，0，12，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，−1.5，
CE，7，0，10，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，1.5，
CE，8，0，9，UZ，1，11，UZ，−1，11，ROTX，3，
```

（2）施加约束

进入求解模块 Solution。

1）设模型后立面为固定面，即在 Z=0 平面上约束全部自由度。

执行路径 Utility Menu>Select>Entities，在对话框中第一行下拉菜单中选择 Nodes，第二下拉菜单中选择 By Location，坐标轴选择 Z 坐标，输入框中输入 0，单击 OK 按钮，完成节点的选择。

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，单击 All pick 按钮，弹出对话框施加 All DOF，约束效果如图 13−32 所示。

选择节点命令流：NSEL，，LOC，Z，0

对已选节点施加约束命令流：D，ALL，ALL

2）在 Z=150 面上施加 Y 和 Z 方向的旋转约束。

执行路径 Utility Menu>Select>Entities，拾取 Z=150 的所有节点，方法同 Z=0 截面节点的拾取。

命令流：NSEL，，LOC，Z，150

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，单击 All pick 按钮，在弹出对话框中施加 ROTY 和 ROTZ，约束效果如图 13−32 所示。

约束选择自由度命令为 ROTX、ROTY、ROTZ。此处使用命令流如下：

```
D，ALL，ROTY
D，ALL，ROTZ
```

（3）施加弯矩

在 Z=150 截面上的节点 7 和节点 11 上各施加 X 方向的弯矩 300E3。执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes，弹出对话框，拾取节点 7 和节点 11，单击 OK 按钮，选择 MX 选项，输入数值 300E3。如图 13-33 所示。命令流如下：

```
F，7，MX，300E3
F，11，MX，300E3
```

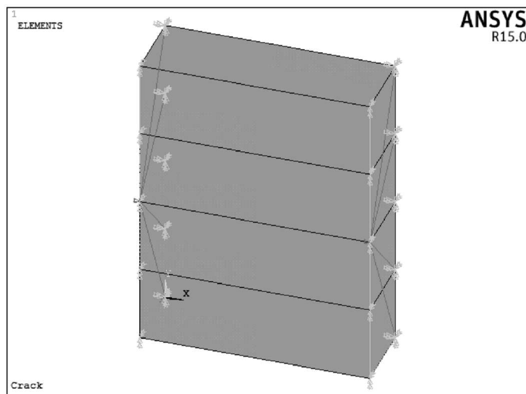


图 13-32　施加 Z=0 面全约束

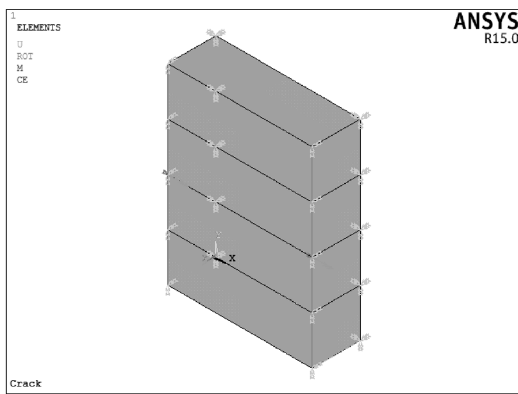


图 13-33　施加弯矩

（4）设置求解选项

打开自动时间不设定开关，将分析子步数设为 5。执行路径 Main Menu>Solution> Analysis Type>Sol'n Controls>Basic，打开 Auto Time Stepping，将 Number of substeps 设置为 5。

（5）求解

设置完毕，开始求解。执行路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

命令流如下：

```
NSUBST，5，0，0              !设置分析子步数
AUTOTS，1                    !激活自动时间步
SOLVE                        !求解
FINI
```

13.2.6 计算结果分析

（1）混凝土的应力分析

梁在弯矩作用下产生应力，其中压应力由混凝土承担，拉应力由钢筋承担。

先获取计算数据。执行路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set，获取混凝土最大压应力值。执行路径 Utility Menu >Parameters>Get Scalar Data>Results Data>Nodal Results，输入参数名 SCON，混凝土截面节点号 17，选择 stress>SZ。

获取数据命令：

```
/POST1
SET，LAST
*GET，SCON，NODE，17，S，Z
```

在命令行窗口输入 ETAB，ST，LS，1，执行路径 Main Menu>General Postproc>List Results>Sorted Listing>Sort Elems，输入单元号 1，在下拉菜单中选择 ST。

执行路径 Utility Menu >Parameters>Get Scalar Data>Results Data>Elem table data，在自定义标签输入 STL，单元号为 1，在下拉菜单中选择 ST。

命令：

```
ETAB，ST，LS，1
ESORT，ST
```

显示数据。执行路径 Utility Menu >Parameters>Scalar Parameters，得到钢筋抗拉应力和混凝土抗压应力，如图 13-34 所示。

命令：

```
*GET，STL，SORT，，MAX
*STATUS，PARM
```

绘制截面法向应力云图。执行路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Nodal solu，选择 stress，Z-component of stress。得到如图 13-35 所示的云图。

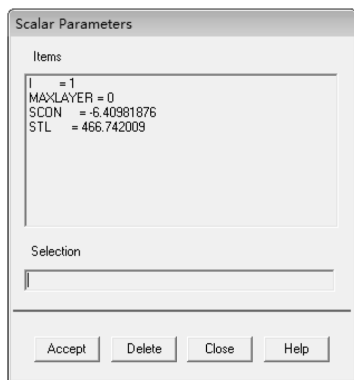


图 13-34　标量参数结果

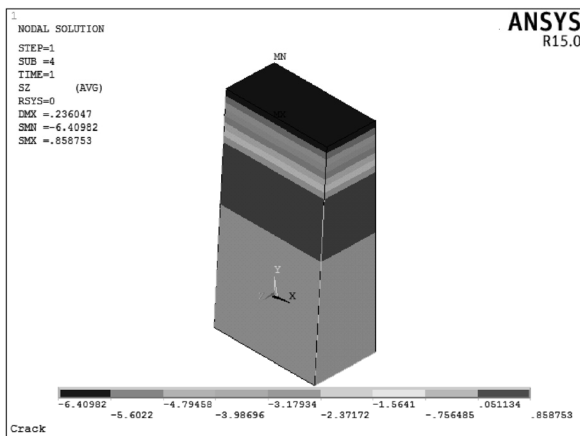


图 13-35　Z 向应力云图

（2）混凝土的变形及应变分析

1）绘制截面变形图。

执行路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deform Shape，选择 Def+undef edge 选项，得到如图 13-36 所示变形图。

2）绘制截面 Z 向变形云图。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，在打开的对话框中选择 DOF Solution，Z –component of displacement，如图 13-37 所示。

3）查看应变云图。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，在打开的对话框中选择 Total mechanical strain 选项，可以查看相应的应变状态。

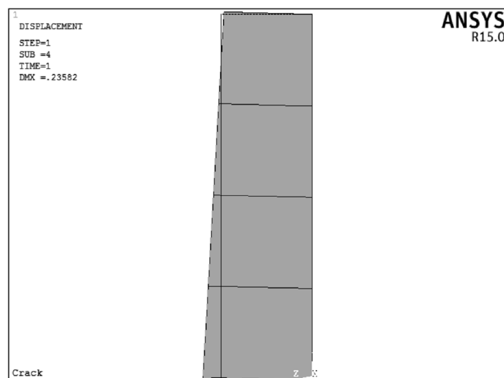


图 13-36 变形图

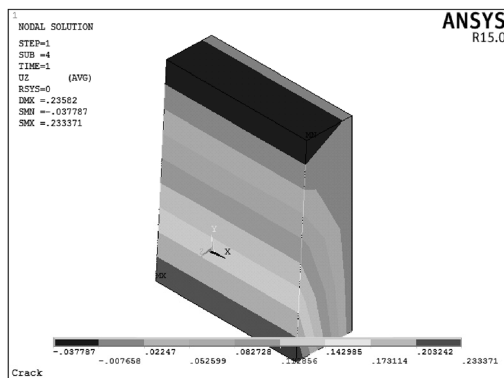


图 13-37 Z 向变形云图

选择 1st principal total mechanical strain，得到第一主应变云图，如图 13-38 所示。

选择 total mechanical strain intensity，得到应变密度云图，如图 13-39 所示。

读取应变的命令流如下：

```
PLNSOL，U，Z，0，1
PLNSOL，EPTO，1，0，1.0
PLNSOL，EPTO，INT，0，1.0
```

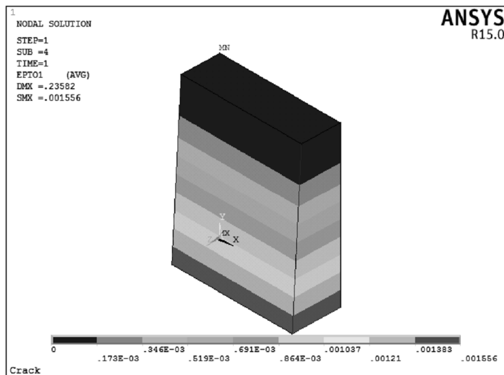


图 13-38 第一主应变云图

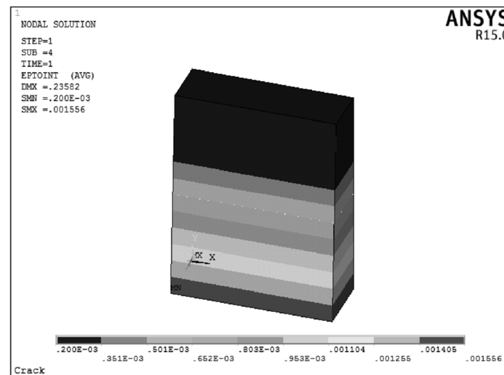


图 13-39 应变密度云图

（3）混凝土开裂

观察开裂情况。

执行路径 Utility Menu>PlotCtrls>Device Options，将 Vector mode 打开，以观察内部裂纹情况。

再执行 Main Menu>General Postproc>Plot Results>ConcPlot>Crack/Crush，查看裂纹情况，如图 13-40 所示。

查看裂缝的命令流方式：

```
/DEVICE，VECTOR，1
PLCRACK
FINISH
```

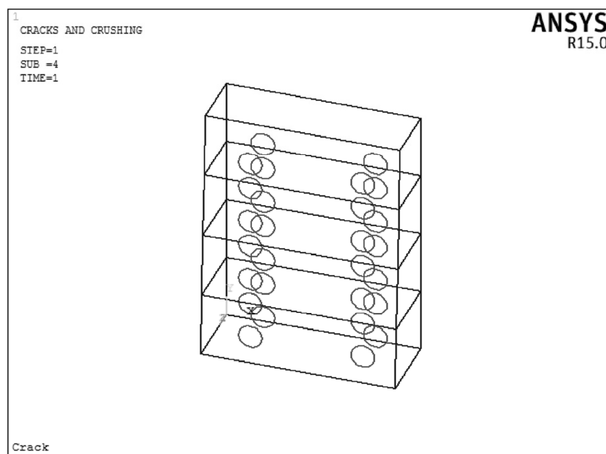


图 13-40　混凝土开裂

13.3　预应力钢筋混凝土

预先用某种方法，在构件上（主要在受拉区）施加压力，当构件承受由外荷载产生的拉力时，首先抵消混凝土中已有的预压力，然后随荷载增加，才能使混凝土受拉后出现裂缝，因而延迟了构件裂缝的出现和开展，这就是预应力混凝土的基本概念。

13.3.1　预应力在 ANSYS 中的实现

在普通钢筋混凝土的结构中，由于混凝土极限拉应力变低，在使用荷载作用下，构件中钢筋的应变大大超过了混凝土的极限拉应变。钢筋混凝土构件中的钢筋强度得不到充分利用。所以普通钢筋混凝土结构，采用高强度钢筋是不合理的。

为了充分利用高强度材料，弥补混凝土与钢筋拉应变之间的差距，人们把预应力运用到钢筋混凝土结构中。亦即在外荷载作用到构件上之前。在 ANSYS 中进行预应力求解通常有 3 种方式。

- 等效力法：就是用与预应力等效的集中力或均布力进行加载。
- 等效应变法：通过位移约束进行加载，使结构中产生的应变与预应力加载产生的应变等效。
- 等效降温法：这种方法比较常用，在不涉及热分析的结构分析中非常实用。该法是通过设置各向异性的温度应变系数，经过应力-应变关系推算，在给定的温差下就可以获得与预应力产生的应变等效的效果。

13.3.2　问题描述

有一矩形截面混凝土梁，其截面形状如图 13-41 所示。

在其截面下端距边缘 200mm 处的两个三等分点分别布有预应力钢筋。求空载时该预应力梁的受力分布情况。

（1）截面尺寸

梁全高 1600mm，宽 900mm。梁段长 5000mm。

预应力筋选用高强钢筋束，其截面积为 6126mm^2。

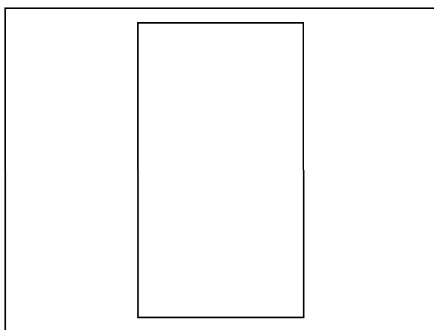


图 13-41　预应力混凝土梁段截面图

（2）材料性能

混凝土，EX=33.5E3，μ=0.2；钢筋，EX=200E3，线膨胀系数α=2e-5，预应力σ=1500。

计算预应力对应的温度变化值ΔT= σ/E/ α=375。

所有单位统一为 N，mm，MPa。

（3）单元类型

本例钢筋采用 LINK180 单元，混凝土采用 SOLID65 单元，定义辅助单元 PLANE182。

13.3.3 前处理

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 Prestress。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

2）定义单元类型，定义 3 种单元类型。

执行路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete。单击 Add 按钮添加单元 LINK180 为 1 号单元，单击 OK 按钮完成定义；再单击 Add 按钮添加 SOLID65 为 2 号单元；添加 PLANE182 为 3 号单元。单击 OK 按钮完成单元类型定义，并关闭对话框。

定义单元类型的命令流如下：

```
/PREP7                          !进入前处理模块
!定义单元类型                    !
ET，1，LINK180                   !钢筋单元
ET，2，SOLID65                   !混凝土单元
ET，3，PLANE42                   !过渡用的平面单元
```

3）定义实常数。本例需要为 LINK180 定义实常数。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete，在打开的对话框中单击 Add 按钮，选择 LINK180，单击 OK 按钮。

在 RealConstantset Number 1，For LINK180 中，为其设置截面尺寸 AREA=6126。

为 SOLID65 定义实常数 2，前面路径相同，在实常数设定的对话框中直接单击 OK 按钮跳过。完成实常数设置。

相应命令如下：

```
R，1，6126
R，2
```

4）定义材料属性。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

● 材料 1，定义预应力钢筋束。

选择对话框右半栏 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>sotropic 选项，双击后在对话框输入数值，EX：200e3；PRXY: 0.3。

命令流：

```
MP，EX，1，2E5
MP，PRXY，1，0.3
```

通过路径 Material Models Available> Structural>Thermal Expansion Coef>Isotropic，设置线膨胀系数为 2e-5，单击 OK 按钮完成钢筋束的材料定义。

命令流：

```
MP，ALPX，1，2E-5
```

● 材料 2，定义混凝土。

选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>sotropic 选项，双击后在对话框中输入数值，EX：33.5e3 ；PRXY: 0.2。

命令流：

```
MP，EX，2，3.35E4
MP，PRXY，2，0.2
```

5）建立截面几何模型。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas> Rectangle>By 2 Corners 创建几何模型。在弹出的对话框中输入 Width=900，Height=1600，单击 OK 按钮完成建模，如图 13-42 所示。

用户可以使用 BLC 命令生成矩形：

```
BLC4,，，900，1600
```

6）划分预应力筋位置。先设置工作面位置，通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments 将工作面移动到预应力筋所在位置，在 XYZ Offsets 输入框中输入 450，200；XY，YZ，ZX Angles 中输入 0，90。

设置好工作面后，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Divide>Area by WrkPlan，选择面 a1，进行划分。此时 a1 被分为 a2，a3 两个新面，如图 13-43 所示。

通过工作面划分平面的命令流如下：

```
WPOFF，450，200
WPROT，0，90
ASBW，1
```

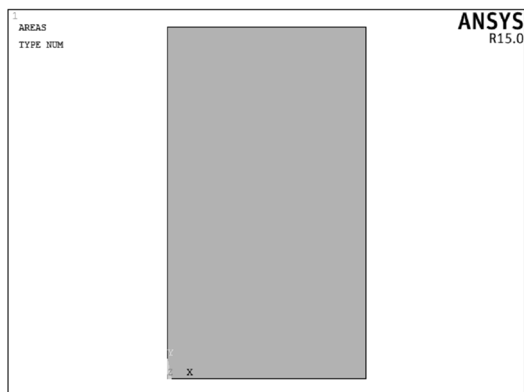


图 13-42 生成截面几何模型



图 13-43 划分出预应力筋位置

再在 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments 弹出的对话框中，在 XYZ Offsets 输入框中输入-150，0，0；在 XY，YZ，ZX Angles 输入 0，0，-90，然后划分面 a2，二者交点在之后会形成预应力筋所在直线。此时由 a2 切分生成的面为 a1，a4，如图 13-44 所示。

通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Offset WP by Increments，在弹出的对话框中的 XYZ Offsets 输入框中输入 300，0，0，然后划分面 a4，二者交点在之后会形成第二根预应力筋所在直线。此时由 a4 切分生成的面为 a5，a2，如图 13-45 所示。

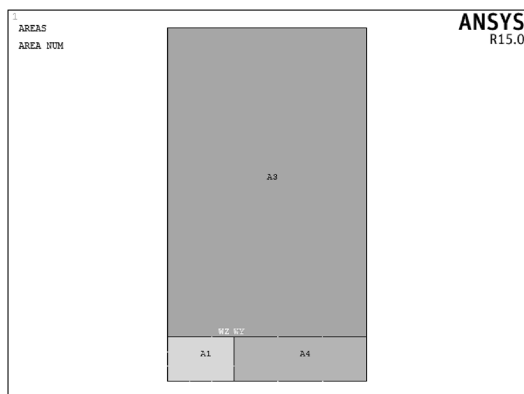


图 13-44 划分出第一根钢筋位置

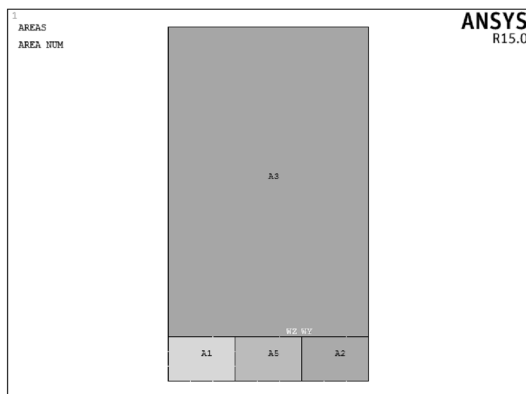


图 13-45 划分出第二根钢筋位置

相应命令流如下：

```
WPOFF，-150，
WPROT，0，0，-90
ASBW，2
```

```
WPOFF，0，，-300，
ASBW，4
```

7）编辑几何模型。现在进行各面之间的粘合，并删除重合的元素。

操作方法为通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Areas，拾取所有面元素，进行粘合。

粘合面元素的命令为：AGLUE，ALL

交界部位出现重叠直线及关键点元素，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Merge Items，Label 选择 ALL，合并所有重叠元素。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Compress Numbers，压缩所有元素的编号。

合并元素命令为：NUMMRG，ALL

压缩编号命令为：NUMCMP，ALL

此时几何模型及各部分对应编号如图 13-46 所示。

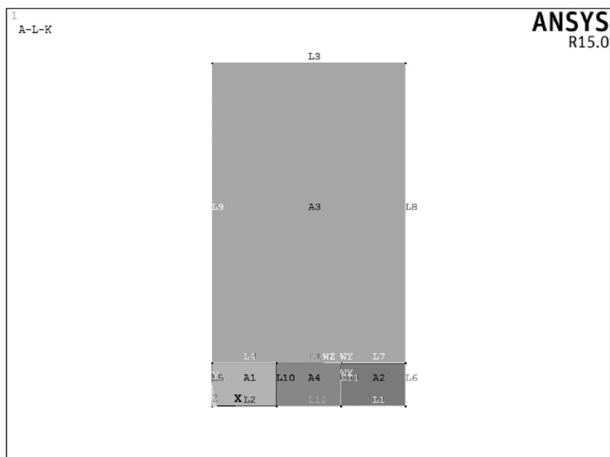


图 13-46　几何元素编号

8）划分平面网格。目前建立的几何模型只是一个平面，需要先对该平面进行网格划分，然后将其拉伸为体网格，最后为生成的预应力筋所在的直线划分网格。

为边设定单元份数，控制划分面网格。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>Picked Lines，拾取 L1，L2，L4，L7，L13，L12，设置划分份数 NDIV 为 5，同样的方式，拾取 L5，L6，L10，L11 划分为 4 份；L8，L9 划分为 20 份；L3 划分为 15 份。

选择直线及设定划分份数的命令如下：

```
LSEL，S，，，1，2
LSEL，A，，，4，7，3
LSEL，A，，，12，13
LESIZE，ALL，，，5
```

注意：在使用命令流方式进行直线选择时，要经常用到 ALLSEL，ALL 这个命令，重新拾取全局的所有元素。

```
ALLSEL，ALL
LSEL，S,,，5，6
LSEL，A,,，10，11
LESIZE，ALL,,，4
ALLSEL，ALL
LSEL，S,,，8，9
LESIZE，ALL,,，20
ALLSEL，ALL
LESIZE，3,,，15
```

与 L3 对应的直线部分有 3 段直线 L4，L13，L7，为了划分网格不出现畸变，现将其连为一体。在网格划分后可再进行删除。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>Concatenate>Lines，拾取直线 L4，L13，L7，单击 OK 按钮，完成合并直线。连接直线命令：LCCAT。

具体使用方法如下：

```
LSEL，S,,，4，7，3
LSEL，A,,，13
LCCAT，ALL
```

最后的直线如图 13-47 所示。

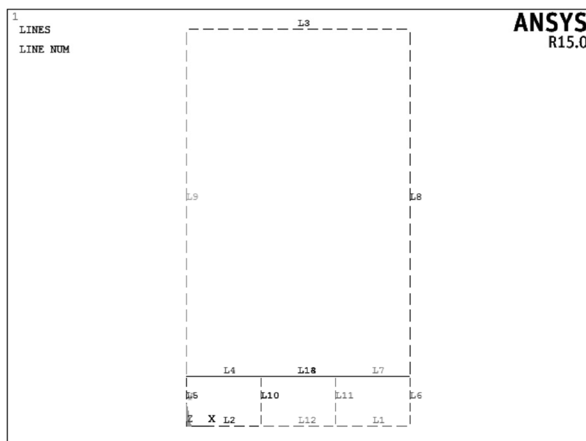


图 13-47　尺寸设定后的直线

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>3 or 4 sided，选择面 a1～a4 进行划分。划分面使用 AMESH 命令，命令流如下：

```
AMESH，1
AMESH，2
AMESH，4
```

```
ALLSEL
AMESH，3
```

划分结束，删除之前连接形成的辅助直线，路径为 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>Del Concats>Lines。

完成面的网格划分，如图 13-48 所示。

相应的删除命令为 LDELE，使用方法如下：

```
LSEL，S，LCCA
LDELE，ALL
```

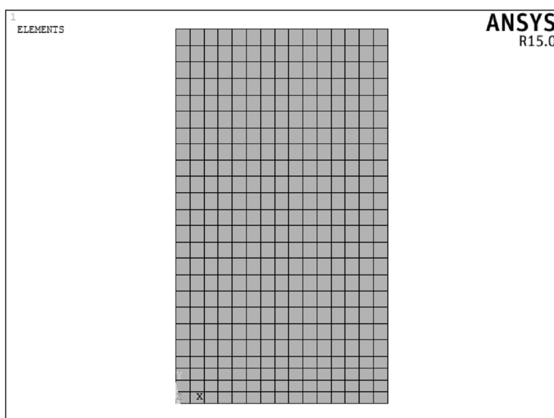


图 13-48　面的网格划分

9）拉伸面网格为体网格。首先设置体网格的相关属性。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Elem Ext Opts 在弹出的对话框中将单元类型、材料模型、实常数等都设置为 2 号，拉伸单元的划分份数为 40，将最后的 ACLEAR 勾选为 YES，即拉伸后删除面网格，设置界面如图 13-49 所示。

设置拉伸属性的命令流如下：

```
TYPE，2
EXTOPT，ESIZE，40，0，
EXTOPT，ACLEAR，1
EXTOPT，ATTR，0，0，0
MAT，2
REAL，2
```

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>By XYZ Offset，选择所有的面，在 Extrude Areas By XYZ Offset 对话框中输入 DZ 方向的值为 5000，单击 OK 按钮完成网格划分。

拉伸命令为 VEXT，具体使用方法如下：

```
VEXT，ALL，，，0，0，5000，，，，
```

10）划分预应力钢筋网格。先通过 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>

Default Attribs 设定单元的材料、实常数、单元类型都为 1。

相应命令如下：

```
TYPE，1
MAT，1
REAL，1
```

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>Picked Lines，选取公共直线 L22，设定单元份数 NDIV=40，执行路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Lines，完成网格的全部划分，如图 13-50 所示。

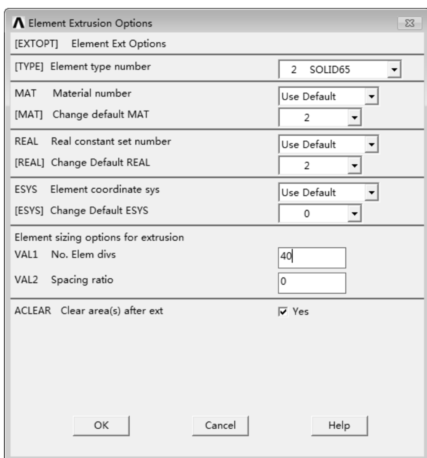


图 13-49 设置单元拉伸选项

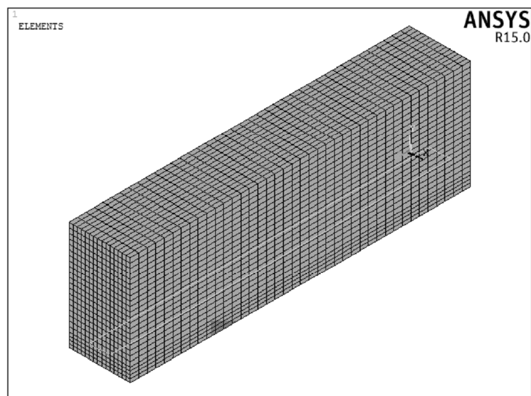


图 13-50 划分后的有限元模型

选定钢筋的命令流为：

```
LSEL,，LOC，Y，200
LSEL，R，LOC，X，300，600，300
```

划分直线的命令流为：

```
LMESH，ALL
FINISH
```

13.3.4 加载及求解

（1）设置边界条件

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，用 By Location 定位 Z=0，Y=0 处的直线。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines，弹出对话框，选择 pick all 选项，在弹出的设置对话框中选择约束全部自由度 ALL DOF。

命令流如下：

```
/SOL
```

```
!通过位置选定直线
LSEL，S，LOC，Z，0
LSEL，R，LOC，Y，0
!约束选定的直线
DL，ALL，，ALL，
```

同样的方式，通过路径 Utility Menu>Select>Entities，用 By Location 定位 Z=5000，Y=0 处的直线。

选定位置的命令流如下：

```
LSEL，S，LOC，Z，5000
LSEL，R，LOC，Y，0
```

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines，弹出对话框，选择 pick all 选项，在弹出的对话框中选择约束全部自由度 UY。相应命令流如下：

```
DL，ALL，，UY，
ALLSEL，ALL
```

其结果如图 13-51 所示。平面侧视图如图 13-52 所示。

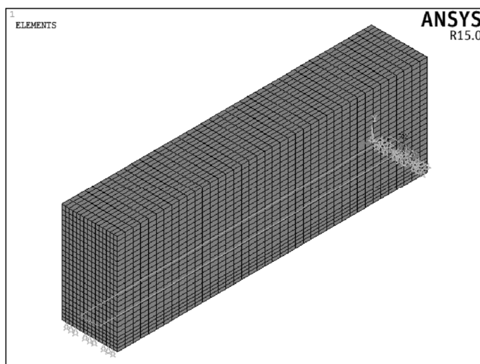


图 13-51　约束后的模型

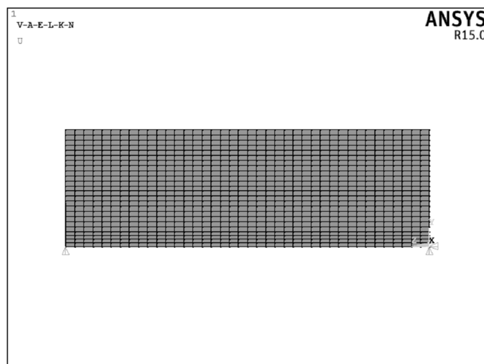


图 13-52　侧视图

（2）施加温度荷载

本例的关键思路是对预应力筋施加温度荷载，通过降温，使其线性收缩，从而达到模拟预应力筋张拉收紧。

在非热分析的项目中这种方法非常实用，实际操作起来也很简单。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Temperature>On Lines，拾取线 L22，单击 OK 按钮弹出 Apply TEMP on lines 对话框，在 temperature 中输入-375。

命令流如下：

```
!通过位置选定钢筋束
LSEL，，LOC，Y，200
LSEL，R，LOC，X，300，600，300
```

```
!施加温度荷载
BFL，ALL，TEMP，-375
```

（3）设置分析选项

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls，打开 Solution Controls 对话框，如图 13-53 所示。

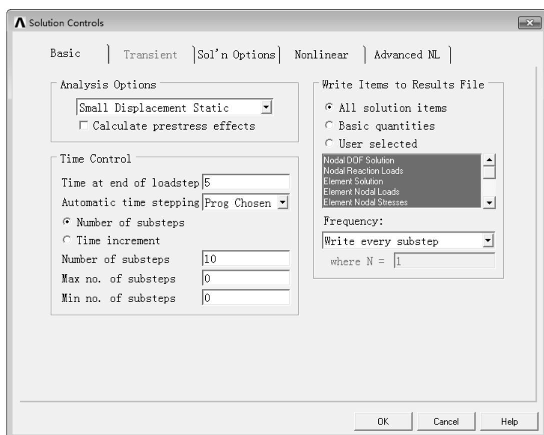


图 13-53　Solution Controls 对话框

在弹出的对话框中选择 Basic 选项卡，设置加载时间为 5，加载子步数为 10，结果输出频率设为 Write Every Substep。

在弹出的对话框的 Nonlinear 选项卡中，单击 Set convergence criteria，然后设置力的收敛容差为 0.05。

相应命令流如下：

```
CNVTOL，F，，0.05，2，，              !设置收敛容差
NSUBST，10，0，0                     !设置分析子步数
OUTRES，ERASE
OUTRES，ALL，ALL                     !设置输出频率
TIME，5                              !设置加载时间
```

（4）求解

通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，开始求解。

求解命令流为：

```
SOLVE。
```

13.3.5 后处理

（1）梁的变形

在预应力的作用下，混凝土 T 形梁在空载时实际已处于受压状态。通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 查看结构变形上拱，如图 13-54 所示。

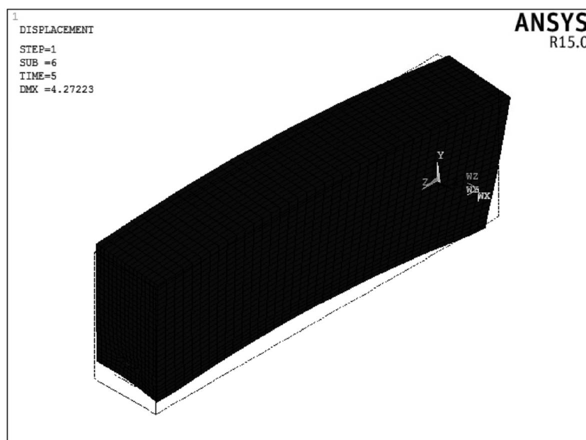


图 13-54　梁变形图

由图可得梁最大变形 4.27mm。

（2）预应力分布图

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 得到 Z 向位移云图，如图 13-55 所示。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 选择查看第一主应力分布，如图 13-56 所示。

命令流如下：

```
/POST1                              !进入后处理
!绘制云图
PLDISP，2                           !变形图
PLNSOL，U，Z，0，1                  !Z 向变形
PLNSOL，U，Y，0，1                  !Y 向变形
PLNSOL，S，1，0，1                  !第一主应力
```

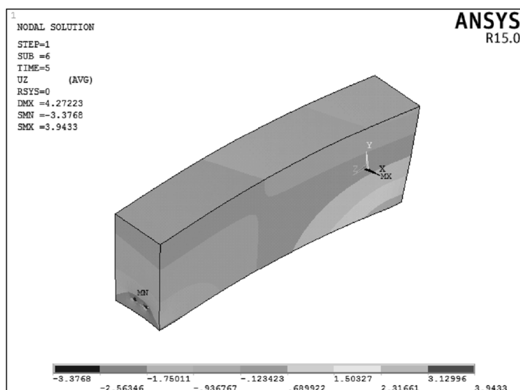


图 13-55　Z 向位移云图

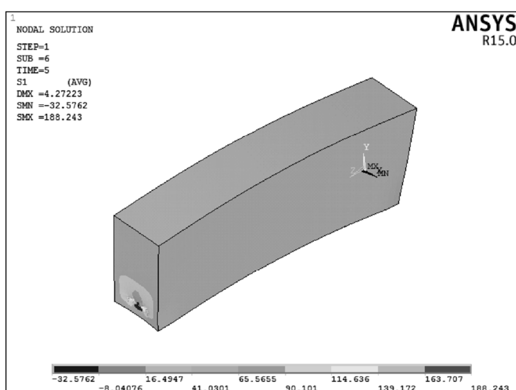


图 13-56　第一主应力分布云图

为了更清楚地看到板内部的主应力分布情况，可以进行设置，使图像只显示等值线。

通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Device Options，勾选 Vector Mode 选项，再进行 Z 向位移的绘制，如图 13-57 所示。通过第一主应力分布的绘制，可得其等值线图，如图 13-58 所示。

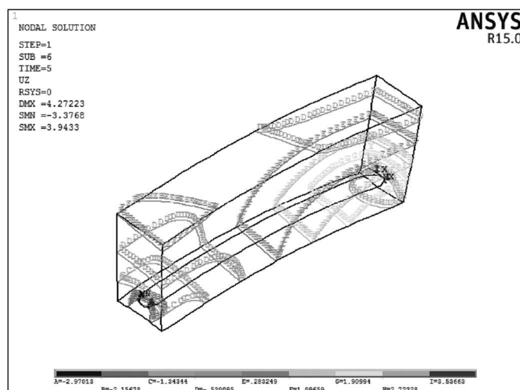


图 13-57　Z 向位移等值线分布图

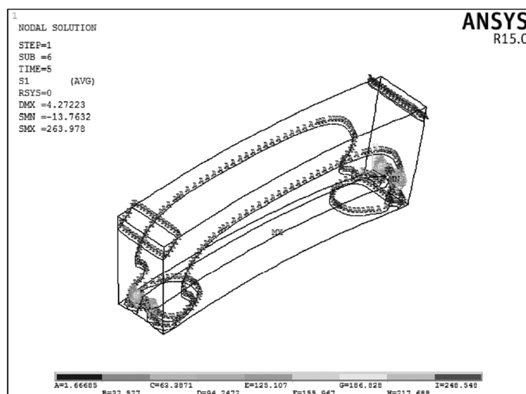


图 13-58　第一主应力等值线图

本阶段命令流：

```
/DEVICE，VECTOR，1                    !显示矢量图
PLNSOL，U，Z，0，1                    !Z 向变形
PLNSOL，U，Y，0，1                    !Y 向变形
PLNSOL，S，1，0，1                    !第一主应力
```

13.4　本章小结

本章首先对钢筋混凝土的基本构件之一钢筋混凝土板进行了建模及静力分析。通过学习，用户应该已经掌握了混凝土的常用单元类型的建模方法。

其后对钢筋混凝土梁中的一小段进行了混凝土开裂分析，通过实例分析，讲述了材料开裂问题的分析方法。本章最后进行了预应力钢筋混凝土梁的预应力分析，重点讲述了预应力筋的实现方法。

第 14 章　钢结构及钢筋混凝土结构分析

结构体系是指结构抵抗外部作用的构件组成方式。本章将对土木工程中常见的钢结构及钢筋混凝土结构体系的典型形式进行建模分析，以帮助用户熟悉不同结构体系的建模方法。

本章学习目标

- 掌握钢结构的常用单元类型。
- 掌握钢筋混凝土框架结构的快捷建模方法。

14.1　钢结构排架受力分析

钢结构排架是以钢材制作为主的结构，是主要的建筑结构类型之一。本节将对钢结构的排架结构进行建模及受力分析。

14.1.1　钢材特点

钢材的特点如下。

- 强度高、自重轻、刚度大，故用于建造大跨度和超高、超重型的建筑物特别适宜。
- 材料匀质性和各向同性好，属理想弹性体，最符合一般工程力学的基本假定。
- 材料塑性、韧性好，可有较大变形，能很好地承受动力荷载。

14.1.2　问题简述

如图 14-1 所示。一排架结构尺寸为 12m×10m×9m，弹性模量 E=2.06E5，泊松比 μ=0.3，材料质量密度 ρ=7.85E-9。

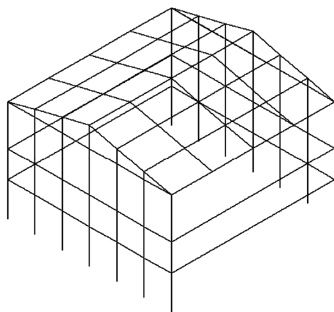


图 14-1　排架几何模型

（1）单元类型、实常数和截面类型

单元类型：BEAM188。

各构件形状及尺寸：

- 主立柱：钢管ϕ180×10，Ri=80mm，R0=90mm。
- 大横梁：工字钢 210mm×180mm×8mm×20mm。
- 屋顶各梁：工字钢 150mm×100mm×6mm×10mm。
- 屋顶梁支撑：钢管ϕ50×8，Ri=17mm，R0=25mm。



（2）荷载值

竖向荷载：

- 屋顶角节点荷载 1.5kN。
- 边上节点荷载 F/2=3kN。
- 中间节点荷载 6kN。

水平荷载：

- 立面角节点荷载为 1kN。
- 边上节点荷载为 2kN。
- 中间节点荷载 4kN。

加速度荷载 ACEL 分项值：0，−13000，5000（mm/s^2）

（3）边界条件

钢框架与地接连的整个方向位移和转角全约束。

14.1.3 前处理

本模型节点多，但是符合一定规律，如果多运用图形的复制和镜像功能，则可大大简化操作步骤。

运行 ANSYS 15.0，设置好工作路径及名称，单击 RUN 按钮进入 GUI 界面。选择 Main Menu 中的 Preferences 命令，弹出一个对话框，勾选 Structural 选项。

（1）单元类型

在主菜单中依次展开选项 Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，弹出 Element Types 对话框，单击 ADD 按钮添加 BEAM188 单元。

相应命令流如下：

```
/CLEAR
!进入前处理模块
/PREP7
!定义单元
ET，1，BEAM188
```

（2）设置截面特性

设置截面属性。对应用 BEAM188 的各主梁柱进行截面尺寸设定。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections，打开 Beam Tool 对话框。

下面进行详细设置说明。

已知钢管尺寸为ϕ180×10 Ri=80mm，R0=90mm。在出现的对话框中进行下列相应设定，如图 14-2 所示。大横梁为工字钢 210×180×8×20，如图 14-3 所示。

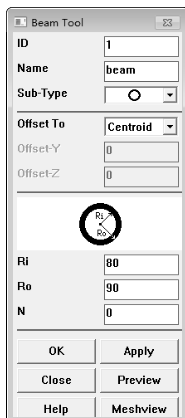


图 14-2　钢管

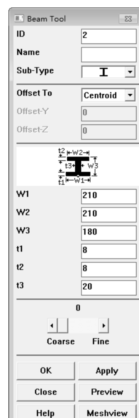


图 14-3　工字钢

相应命令流如下：

```
!定义截面
SECTYPE，  1，BEAM，CTUBE，，0                !定义圆管型
SECOFFSET，CENT
SECDATA，80，90，0，0，0，0，0，0，0，0
SECTYPE，  2，BEAM，I，，0                    !定义工字钢
SECOFFSET，CENT
SECDATA，180，180，210，8，8，20，0，0，0，0
```

同理，对其他截面进行设置。参数如下：

屋顶各梁：工字钢 150×100×6×10。

屋顶梁支撑：钢管ϕ50×8，Ri=17mm，R0=25mm

命令流如下：

```
SECTYPE，  3，BEAM，I，，0                    !定义工字钢
SECOFFSET，CENT
SECDATA，100，100，150，6，6，10，0，0，0，0
SECTYPE，  4，BEAM，CTUBE，，0                !定义圆管型
SECOFFSET，CENT
SECDATA，17，25，0，0，0，0，0，0，0，0
```

（3）定义材料属性

在主菜单中依次选择 Preprocessor>Material Props>Material Models 命令，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，设置弹性模量 E=2.06E5，泊松比 μ=0.3，材料质量密度 ρ =7.85E−9。

（4）建立几何模型

以框架前角柱上的点为起始点。坐标如下：

```
K，1，0，0，5000
K，2，0，3000，5000
K，3，0，6000，5000
K，4，0，7500，5000
```

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS，依次建立上述 4 点，如图 14-4 所示。

依次拾取各点，连点成线，路径为 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Lines>Straight Lines。

先连竖向直线，如图 14-5 所示。

在合理设定关键点编号次序的情况下，可以使用命令流中的*DO 循环语句，很快捷地生成多道直线。命令流如下：

```
!利用循环语句生成直线
*DO，I，1，3，1                    ！开始循环
    LSTR，I，I+1，                 ！循环对象：生成直线的命令
*ENDDO                             ！循环结束
```

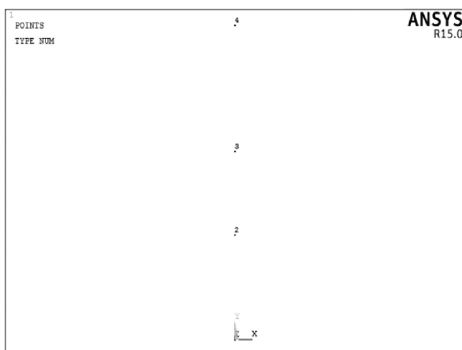


图 14-4　生成 4 个关键点

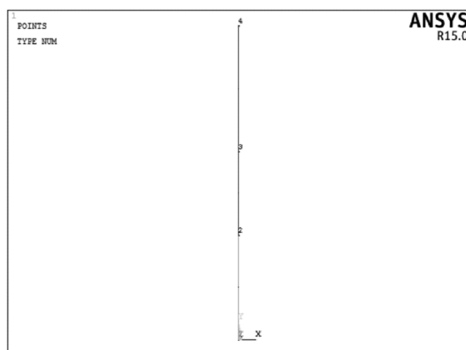


图 14-5　生成第一列直线

由于各立柱及柱间悬索等距排列，几何模型相同，因此直接用复制命令。复制命令路径如下为 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Lines。弹出对话框如图 14-6 所示。

拾取需要复制的直线，并设定好份数（包括本身）和平移。

本例复制 6 份，包括本身则为 7 份。每一部分相距 2m，本例单位取 mm，因此在 DX 中输入 2000。单击 OK 按钮生成如图 14-7 所示 7 组直线。

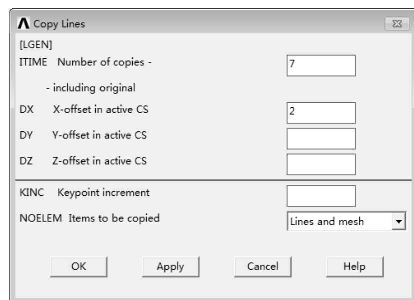


图 14-6　复制直线

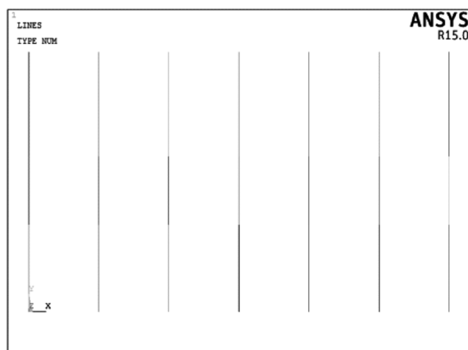


图 14-7　复制好的 7 组直线

复制命令如下：

```
LGEN，7，1，3，，2000，，，，0，0
```

复制好的直线及关键点将依次被自动编号。用户可在 Utilty Menu>Plotctrls>Numbering 中进行点和线的编号显示与否的设置。

生成水平直线。

模型底边为接地端，所以不用连接。依次连接关键点 2，点 6，点 10～点 26 所在的水平直线。注意此处是 6 条线段，不是一条。同样生成其余各水平向直线。

建立屋架上弦各点。

```
K，29，2000，8000，5000
K，30，4000，8500，5000
K，31，6000，9000，5000
K，32，8000，8500，5000
K，33，10000，8000，5000
```

将屋架上弦各点连接成线，如图 14-8 所示。将生成的屋架向 Z 向复制 3 份，即设置 ITIME 为 4。复制屋架方法同复制竖向直线。生成后如图 14-9 所示。

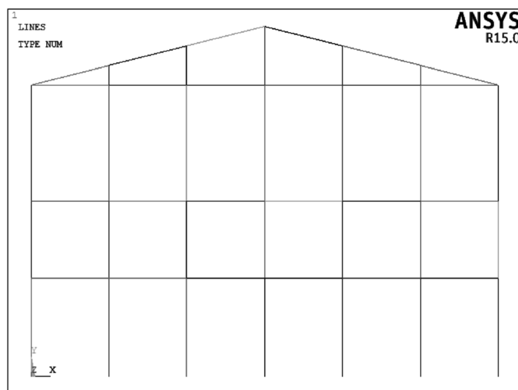


图 14-8　正立面框架和屋架

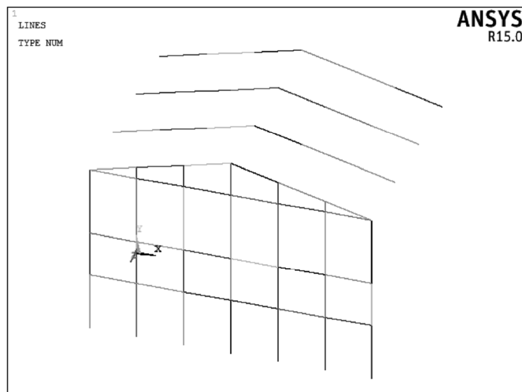


图 14-9　复制屋架

对第一排架进行镜像，生成房屋背面的框架。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Lines，由于直线数量较多，所以选择 min，max，inc 选项，输入最小直线编号 1，最大编号 50，默认增量步长 1。单击 OK 按钮，出现镜像设置对话框，选择 XY 平面为镜像面。最后生成如图 14-10 所示。

镜像命令如下：

```
LSYMM，Z，1，50
```

连接前后排架间相应关键点，完成几何模型的建立。连接前后排架命令流如下：

```
*DO，I，29，33，1
    LSTR，I，I+6，
```

```
*ENDDO
*DO，I，34，47，1
    LSTR，I，I+7，
*ENDDO
*DO，I，49，53，1
    LSTR，I，I+34，
*ENDDO
```

最后生成全图如图 14-11 所示。

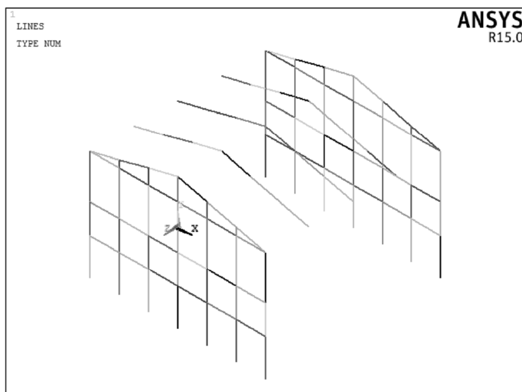


图 14-10 镜像后的直线图

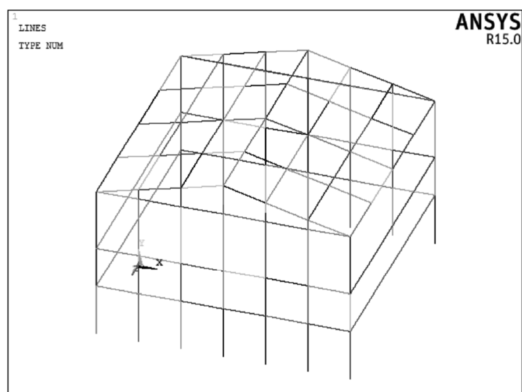


图 14-11 几何模型全图

（5）网格划分及赋予属性

本例中各直线段为一个单元即可，主要是赋予材料及相应的属性。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool，选择 Lines，set，拾取 6 根主立柱。选择相应的材料属性，如图 14-12 所示。单击 OK 按钮完成立柱属性的赋值操作。

相应命令流如下：

```
LSEL，S，，，1，3                       !选择所有立柱
LSEL，A，，，10，12
LSEL，A，，，19，21
LSEL，A，，，48
LSEL，A，，，87，89
LSEL，A，，，78，80
LSEL，A，，，116
LSEL，A，，，69，71
CM，LIZHU，LINE                        !创建立柱集合
CMSEL，S，LIZHU                        !选中立柱集合
LATT，1，1，1                          !为集合内所有立柱赋属性
LESIZE，LIZHU，，，1，，，，，1          !网格尺寸控制
LMESH，ALL                             !划分网格
```

完成其他梁、杆的属性及划分设置。

划分主次梁单元：

```
!主梁
LSEL，S,,，34，45
LSEL，A,,，102，113
……
CM，ZHULIANG，LINE
CMSEL，S，ZHULIANG
LATT，1，1，1,,,，2
LESIZE，ZHULIANG,,，1,,,,，1
!次梁
LMESH，ALL
LSEL，S,,，119，123                      !选择直线
LSEL，A,,，125，129                      !向集合内添加新直线
……
LSEL，U,,，140                           !剔除多选的直线
CM，CILIANG，LINE
CMSEL，S，CILIANG
LATT，1，1，1,,,，3
LESIZE，CILIANG,,，1,,,,，1
LMESH，ALL
!连杆
LSEL，S,,，4，18
LSEL，U,,，10，12
……
LSEL，A,,，90，101
CM，LIANGAN，LINE
CMSEL，S，LIANGAN
LATT，1，1，1,,,，4
LESIZE，LIANGAN,,，1,,,,，1
LMESH，ALL
FINISH                                   !退出前处理模块
```

通过 Utilty Menu>Plotctrls>Style>Size and shape 可以显示单元的属性特征，如图 14-13 所示。

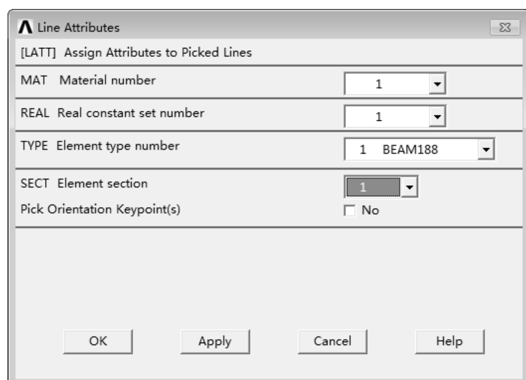


图 14-12　属性赋予

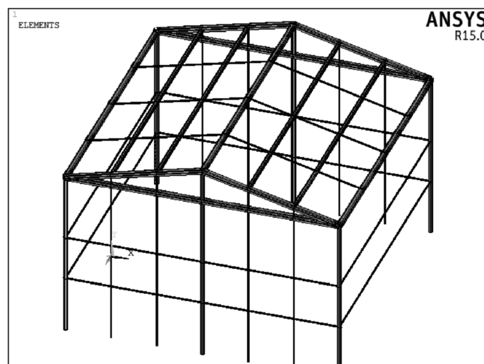


图 14-13　显示单元属性特征

屋架与柱连接处局部放大图如图 14-14 所示。屋架局部放大图如图 14-15 所示。

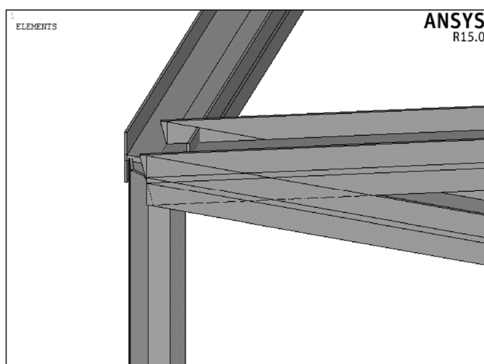


图 14-14　屋架与柱连接处局部放大图

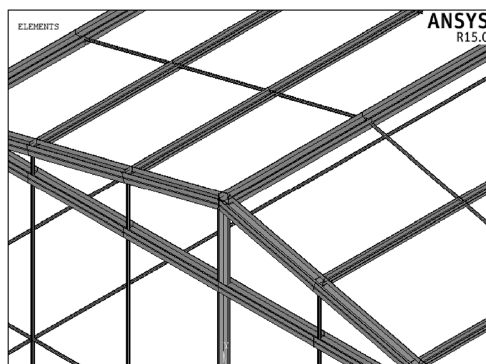


图 14-15　屋架局部放大图

14.1.4 加载及求解

（1）施加约束

对所有柱子的柱脚施加全方位约束。

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes。

拾取所有需要约束的节点，单击 OK 按钮，在弹出的对话框中选择 ALL DOF 选项，VALUE 设为 0。

约束后的模型如图 14-16 所示。

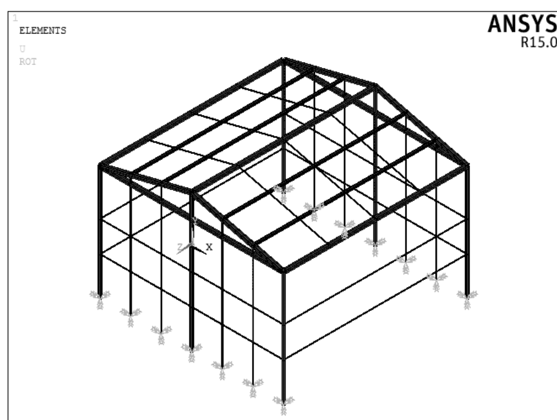


图 14-16　施加水平荷载

命令流如下：

```
!进入求解模块                              !选择要约束的点
/SOLU
!施加约束
NSEL，S，，，1，9，4，，                    !选择施加约束的点
```

```
NSEL，A,,，14，22，4,,
NSEL，A,,，64，85，3,,
D，ALL，ALL，0                          !约束
```

（2）施加水平荷载

立面角节点荷载为 1kN，边上节点荷载为 2kN，中间节点荷载 4kN，对前立面的两个上角点施加节点荷载 1kN。

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes，拾取两节点 4 和节点 28，单击 OK 按钮。

施加沿 Z 的荷载，值为-1000。对立面边缘施加沿 Z 的荷载，值为-2000。

拾取其余立面中间各点，施加沿 Z 的荷载，值为-4000。

施加 Z 向荷载的命令流如下：

```
NSEL，S,,，4,                           !选择要施加荷载的点
NSEL，A,,，12,
F，ALL，FZ，-1000                       !施加荷载
NSEL，S,,，2，3
NSEL，A,,，10，11
NSEL，A,,，13
NSEL，A,,，31，34
F，ALL，FZ，-2000
NSEL，S,,，6，8
NSEL，A,,，27，30
NSEL，A,,，65，66
NSEL，A,,，68，69
NSEL，A,,，71，72
NSEL，A,,，74，75
F，ALL，FZ，-4000
NSEL，S,,，4,
NSEL，A,,，12,
NSEL，A,,，17,
NSEL，A,,，25,
```

（3）竖向荷载

屋顶角节点荷载 1.5kN，边上节点荷载 3kN，中间节点荷载 6kN。

对节点 4，28，58，82 施加沿 Y 的竖向荷载，值为-1500。

对边缘处除上述节点外，施加沿 Y 的竖向荷载，值为-3000。

对屋面中间各点施加沿 Y 的竖向荷载，值为-6000。

施加 Y 向荷载的命令流如下：

```
NSEL，S,,，4,
NSEL，A,,，12,
F，ALL，FY，-1500                               施加荷载
NSEL，S,,，39，42
NSEL，A,,，26
```

```
……
NSEL，U,,，50
F，ALL，FY，-3000
NSEL，S,,，52，63
NSEL，A,,，43
NSEL，A,,，46
NSEL，A,,，50
F，ALL，FY，-6000
```

施加完荷载后模型如图 14-17 所示。

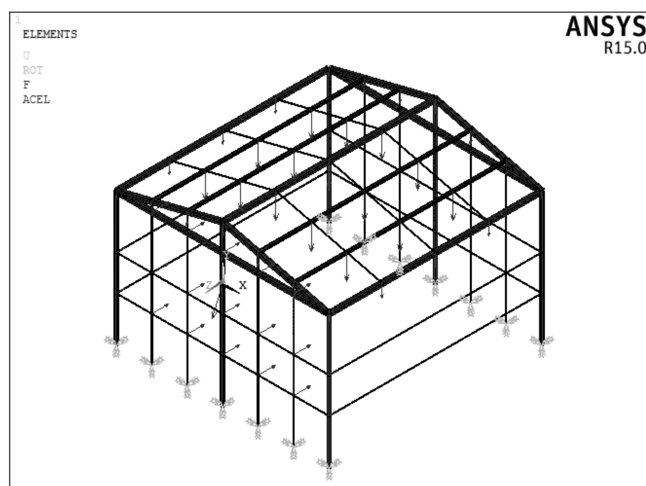


图 14-17　施加完整荷载

（4）加速度荷载

对模型添加各方向的加速度。

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global。设置如图 14-18 所示。

加速度荷载命令流：

```
ACEL，0，-13000，5000，
ALLSEL
```

（5）求解

进入求解阶段。设置求解类型为静力 static。

执行路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis。打开大变形分析。将加载结束时间设为 1，实时间步数设为 4。

执行路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Basic。设置如图 14-19 所示。

设置全部完成后，进行求解。

执行路径 Main Menu>Solution>Solve。

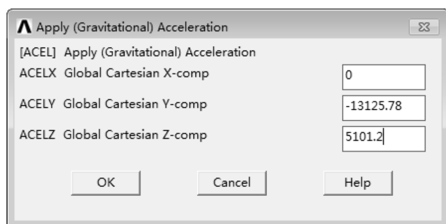


图 14-18　设置加速度

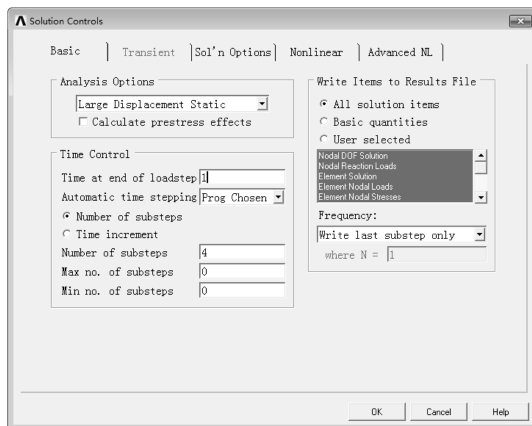


图 14-19　求解设置

本段命令流：

```
!进入求解模块
/SOLU
!设置求解项
ANTYPE，0                                  !分析类型
NLGEOM，1                                  !打开大变形分析
NSUBST，4，0，0                            !设置子步
TIME，1                                    !设置加载时间步长
/STATUS，SOLU
SOLVE                                      !开始求解
FINISH
```

14.1.5 后处理

求解完成后，进入后处理。

（1）查看平动变形情况

通过以下路径查看结构变形及应变情况。

- GUI：Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu。
- GUI：Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape。

命令流为：

```
/POST1                                     !进入通用后处理
PLDISP，2                                  !绘制变形图
PLNSOL，U，X，0，1                         !绘制平动位移云图
PLNSOL，U，Y，0，1
PLNSOL，U，Z，0，1
PLNSOL，U，SUM，0，1
```

如图 14-20 所示，结构最大变形 331.948（mm，下同）。如图 14-21 所示为结构的 X 方向变形云图。如图 14-22 所示为结构的 Y 方向变形云图。如图 14-23 所示为结构的 Z 方向变形云图。

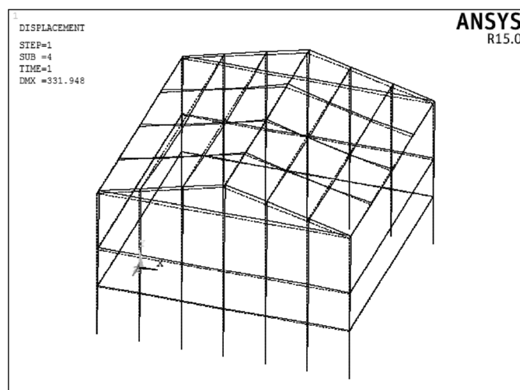


图 14-20 总变形图

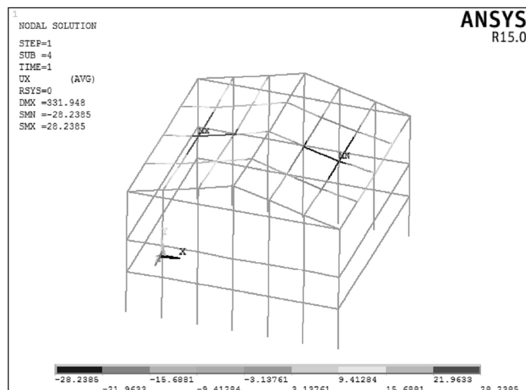


图 14-21 UX 云图

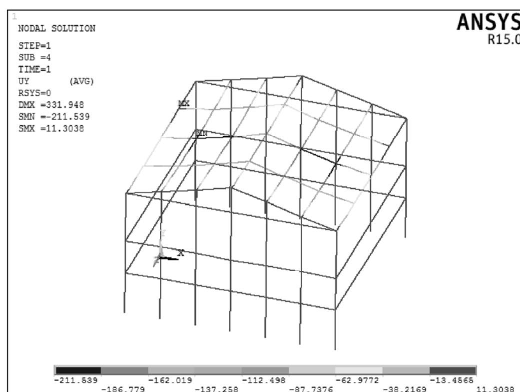


图 14-22 UY 云图

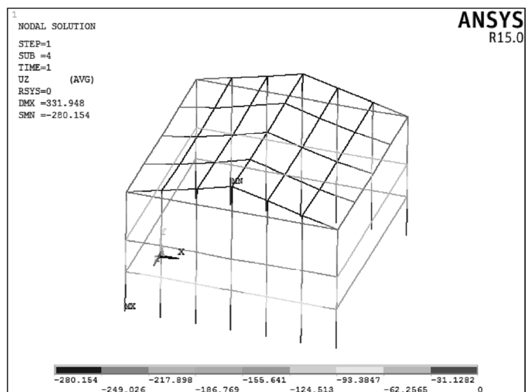


图 14-23 UZ 云图

X 方向最大变形 UX=28.2385；UY=−211.539；UZ=−280.154。

由以上各图可见，沿 Z 轴方向变形最大，且变形主要发生在屋顶架的次梁。

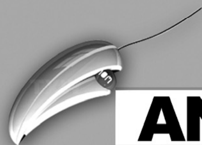
（2）查看扭转变形

查看扭转变形命令流如下：

```
/POST1
!绘制转动位移云图
PLNSOL，ROT，X，0，1.0
PLNSOL，ROT，Y，0，1.0
PLNSOL，ROT，Z，0，1.0
PLNSOL，ROT，SUM，0，1.0
FINISH
```

如图 14-24 所示为绕 X 轴的转动变形，图 14-25 所示为绕 Y 轴的转动变形，图 14-26 所示为绕 Z 轴的转动变形，图 14-27 所示为转动总变形。

绕 X 旋转最严重处在屋顶，绕 Y 发生扭转最严重处为迎风面，绕 Z 轴的扭转在屋顶中部，整体来看，边缘梁中点处是最危险的。



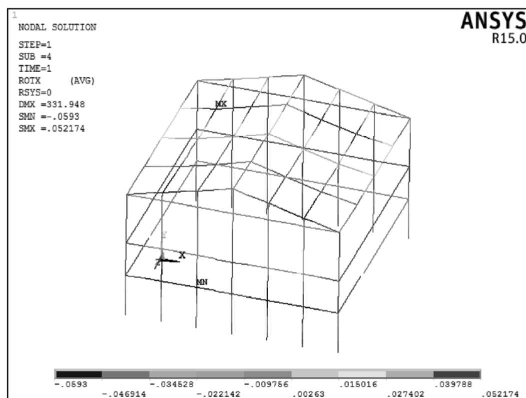


图 14-24　ROT X 云图

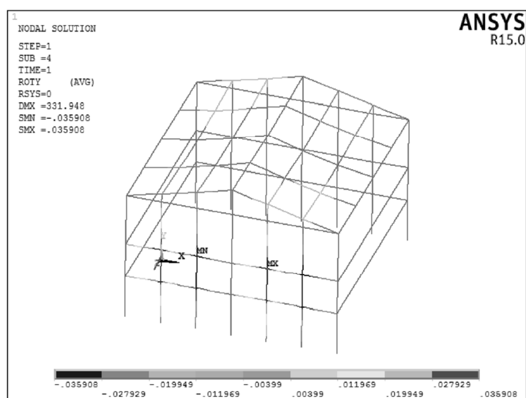


图 14-25　ROT Y 云图

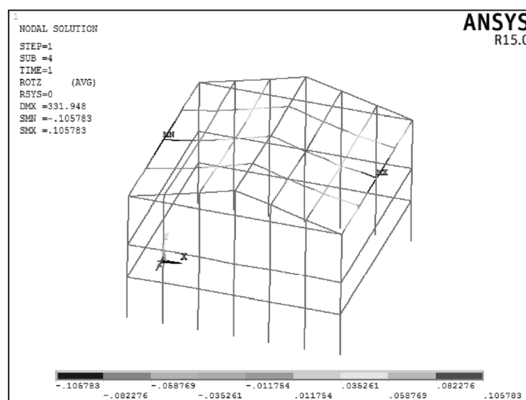


图 14-26　ROT Z 云图

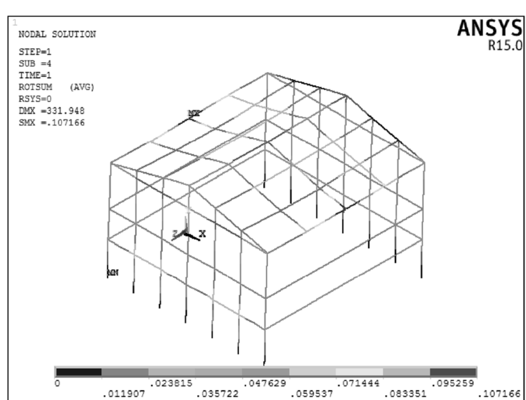


图 14-27　旋转总图

14.2　钢筋混凝土框架结构简单分析

框架结构是指由梁和柱以刚接或者铰接相连接而成构成承重体系的结构，即由梁和柱组成框架共同抵抗适用过程中出现的水平荷载和竖向荷载。

采用框架结构的房屋墙体不承重，仅起到围护和分隔作用，一般用预制的加气混凝土、膨胀珍珠岩、空心砖或多孔砖、浮石、蛭石、陶粒等轻质板材等材料砌筑或装配而成，适合大规模工业化施工，效率较高，工程质量较好。

14.2.1　问题简述

混凝土 6 层框架，其主要结构类型为梁板柱结构。

楼板和屋盖厚度为 200mm，框架主截面为 0.5m×0.5m，横梁截面为 0.3m×0.6m。

其几何形状正立面如图 14-28 所示。侧立面如图 14-29 所示。

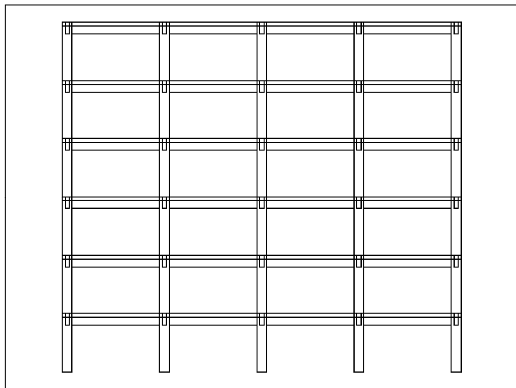


图 14-28 框架正立面图

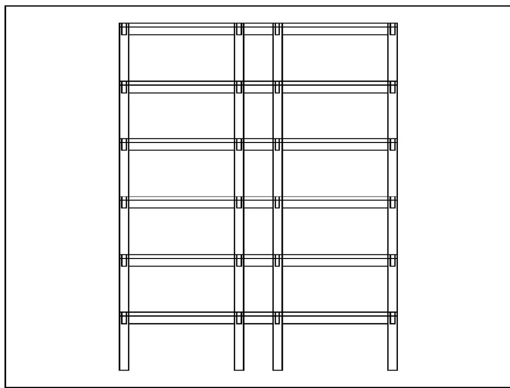


图 14-29 框架侧立面图

14.2.2 前处理

（1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 FRAME

单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

（2）定义单元类型

混凝土采用 SOLID185 单元。

通过路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，单击 Add 按钮添加单元 SOLID185 为 1 号单元。

退回到 Element Types 对话框中，选择 SOLID185，并单击 Options 按钮，打开单元类型选项对话框，如图 14-30 所示。将 K2 设置为 Simple Enhanced Strn，单击 OK 按钮完成设置。

注意：SOLID185 单元没有实常数。

此处命令流为：

```
/PREP7
ET，1，SOLID185
```

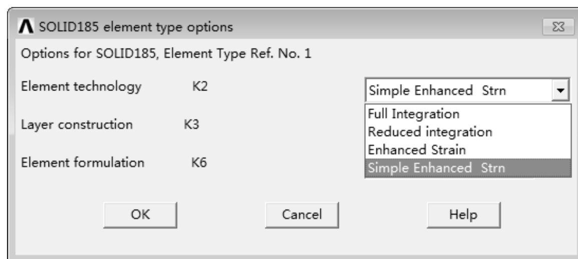
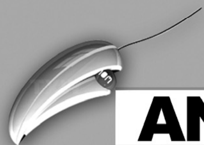


图 14-30 设置混凝土单元

（3）定义材料属性

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。



选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，混凝土 EX:3e10；PRXY:0.1667。

选择 Material Models Available> Structural>Density，输入密度值 2500，单击 OK 按钮完成定义。

相应命令流如下：

```
MP，EX，1，3E10
MP，DENS，1，2500
MP，PRXY，1，0.1667
```

（4）建立几何模型

首先建立框架柱，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS，生成关键点。

关键点坐标为：点 1，(1.25，0，0.25)；点 2，(1.25，0，−0.25)；点 3，(0.75，0，0.25)；

点 4，(0.75，0，−0.25)；点 5，(1.25，12，0.25)；点 6，(1.25，12，0.25)；点 7，(0.75，12，0.25)；点 8，(0.75，12，−0.25)。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>Through KPs，依次拾取关键点 K1～K8。单击 OK 按钮，建立第一根柱子的几何模型，如图 14−31 所示。

本例中各柱子尺寸相同，因此可以利用复制命令进行方便的几何模型操作。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Volumes，拾取已生成的柱子几何体，单击 OK 按钮，弹出 Copy Volumes 对话框。

在 ITIME 中输入 2，DX=6。此操作即：以 X=6 为增量，复制并保留原柱体，最终包括原型共有两个柱体，如图 14−32 所示。

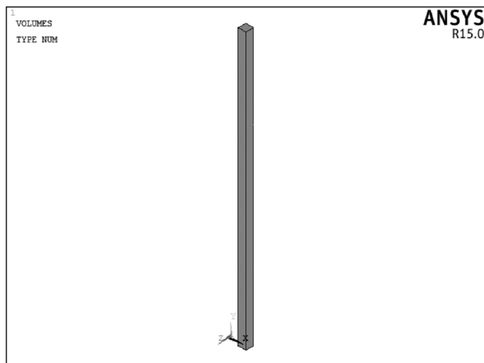


图 14−31　立柱模型

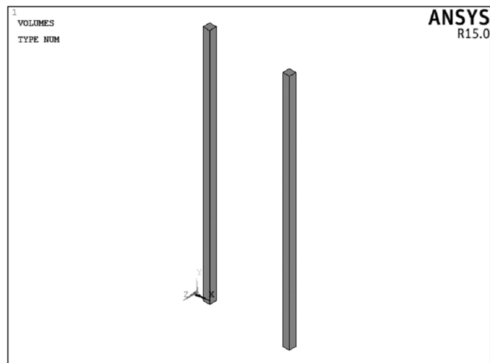


图 14−32　复制生成立柱

以同样的方法，将目前所有的两根柱子几何体同时复制，最终生成 5 排柱。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Volumes，拾取已生成的两根柱子几何体，单击 OK 按钮，弹出 Copy Volumes 对话框，在 ITIME 中输入 5，DZ=5。最终得到如图 14−33 所示的 5 排柱列。

此时只完成了一半柱列。可以通过复制命令完成剩下的一半柱子。

下面采取另一种生成方法：镜像生成体元素。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Volumes，拾取所有的柱体，单击 OK 按钮，弹出 Reflect Volumes 对话框，VSYMM 选择对称面为 YZ 平面。单击 OK 按钮完成镜像，最后生成所有柱体，如图 14-34 所示。

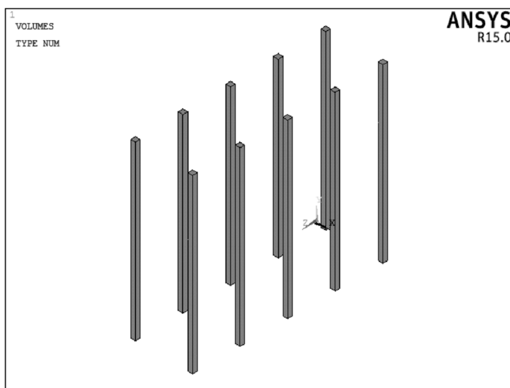


图 14-33　复制生成 5 排柱子

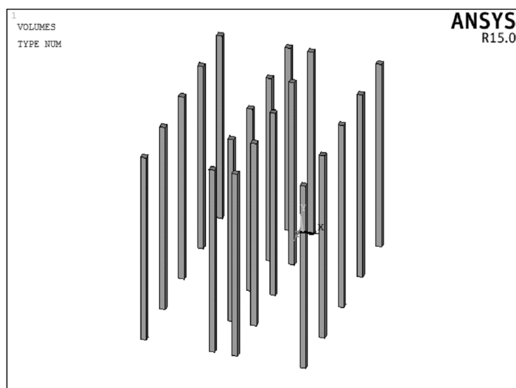


图 14-34　镜像生成另一半柱子

有关复制生成柱和镜像生成柱的命令流如下：

```
K，1，1.25,，0.25，                      !生成 8 个关键点
K，2，1.25,，-0.25，
K，3，0.75,，0.25，
K，4，0.75,，-0.25，
K，5，1.25，18，0.25，
K，6，1.25，18，-0.25，
K，7，0.75，18，0.25，
K，8，0.75，18，-0.25，
V，1，2，4，3，5，6，8，7                 !建立柱体
VGEN，2，all,,，6,,,，0                  !复制
VGEN，5，all,,,,，5,，0
VSYMM，X，all,,,，0，0                   !镜像
```

开始建立横梁。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS，生成横梁的 8 个关键点。关键点坐标为：点 161，(0.75，2.4，−0.11)；点 162，(0.75，2.4，0.11)；点 163，(0.75，3，0.11)；点 164，(0.75，4，−0.11)；点 165，(−0.75，2.4，−0.11)；点 166，(−0.75，2.4，0.11)；点 167，(−0.75，3，0.11)；点 168，(−0.75，3，−0.11)。

同样，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>Through KPs，依次拾取关键点 K161～K168。单击 OK 按钮，建立第一层横梁的中跨几何模型。

通过复制体元素，生成另外 4 根横梁，路径同之前生成柱。ITIME=5，DZ=5。

建立关键点：点 201，（1.25，2.4，-0.11）；点 202，（1.25，2.4，0.11）；点 203，（1.25，3，0.11）；点 204，（1.25，3，-0.11）；点 205，（6.75，2.4，-0.11）；点 206，（6.75，2.4，0.11）；点 207，（6.75，3，0.11）；点 208，（6.75，3，-0.11）。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>Through KPs，依次拾取关键点 K161～K168。单击 OK 按钮，生成第一层右跨梁。

仿照中跨梁生成的方式，生成右跨梁。

通过镜像命令，选择 V26～V30，镜像生成第一层左跨梁。此时，第一层的横梁建立完毕，如图 14-35 所示。

利用复制命令，选择所有底层横梁，ITIME=6，DY=3，生成所有横梁，如图 14-36 所示。

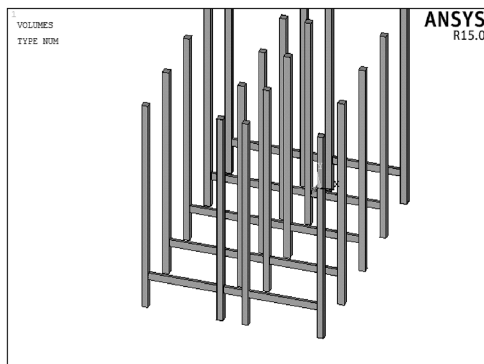


图 14-35　第一层横梁

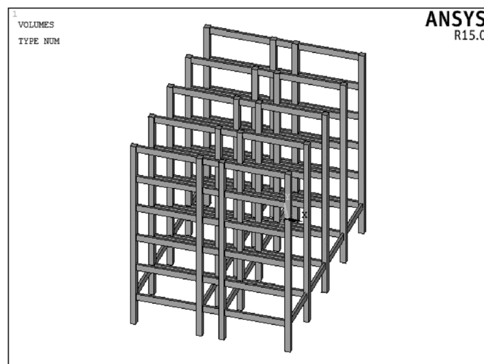


图 14-36　全部横梁

现在建立纵梁。第一根纵梁的关键点坐标为：点 521，（0.89，2.4，0.25）；点 522，（1.11，2.4，0.25）；点 523，（1.11，3，0.25）；点 524，（0.89，3，0.25）；点 525，（0.89，2.4，4.75）；点 526，（1.11，2.4，4.75）；点 527，（1.11，3，4.75）；点 528，（0.89，3，4.75）。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Volumes>Arbitrary>Through KPs 连接各点生成第一根纵梁；通过复制和镜像生成全楼纵梁，方法同前，不做赘述。生成的梁柱框架如图 14-37 所示。

生成楼板。定义板的关键点为：点 905，（-7.25，2.8，-0.25）；点 906，（-7.25，2.8，20.25）；点 907，（7.25，2.8，20.25）；点 908，（7.25，2.8，-0.25）；点 909，（-7.25，3，-0.25）；点 910，（-7.25，3，20.25）；点 911，（7.25，3，20.25）；点 912，（7.25，3，-0.25）。

同样连点成体，生成第一层楼板，如图 14-38 所示。通过复制，ITIME=6，DY=3，生成 6 层楼板。

搭接几何体。此时生成的梁板柱为分离的几何体。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Overlap>Volumes，选择所有几何体，单击 OK 按钮，使各几何元素搭接成整体。

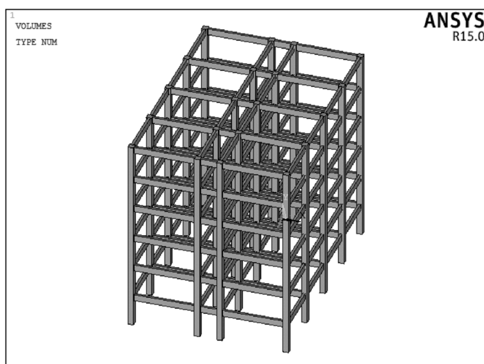


图 14-37 梁柱框架几何模型

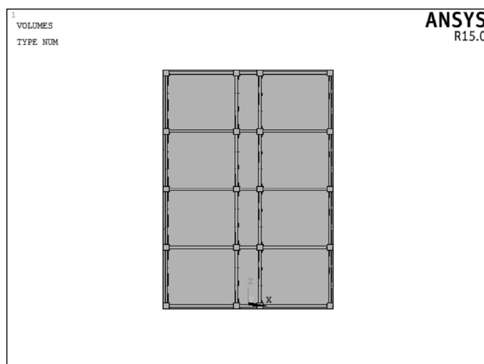


图 14-38 第一层楼板

搭接命令为：

```
!生成体
VGEN，4，66，，，，，5，，0
VGEN，2，66，69，，6，，，，0
VSYMM，X，66，73，，，0，0
VGEN，3，66，81，，，4，，，0
V，905，906，907，908，909，910，911，912
VGEN，3，114，，，，4，，，0
!将所有体进行搭接
VOVLAP，ALL
```

最后得到三层框架楼的几何模型，如图 14-39 所示。

（5）划分网格

几何模型生成后，要通过划分网格将其转换为有限元模型。在此之前先进行单元属性的赋予与网格尺寸控制。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Default Attribs，设定单元属性。单元类型选择 1，MAT 选择 1，单击 OK 按钮完成定义。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>All Lines，为当前所有直线设定单元划分尺寸的大小，在弹出对话框中设定 SIZE=1。

完成设置后，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Volumes>Free 完成网格的划分。

相应的命令流如下：

```
!划分网格
LESIZE，ALL，1，，，，1，，，1，         !控制单元大小
TYPE，1                                !选择单元类型
MAT，1                                 !选择材料属性
ESYS，0                                !单元坐标系
MSHAPE，1，3D                          !定义实体单元形状
MSHKEY，0                              !划分方式
VMESH，ALL                             !体划分单元
```

划分后的有限元模型如图 14-40 所示。

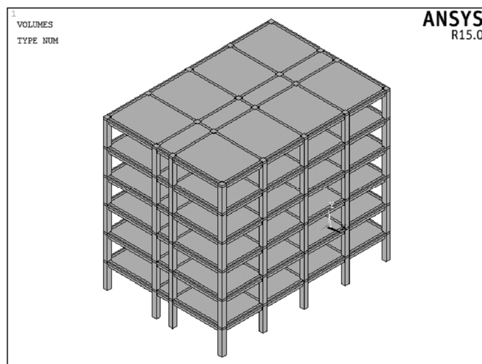


图 14-39　完整的几何模型

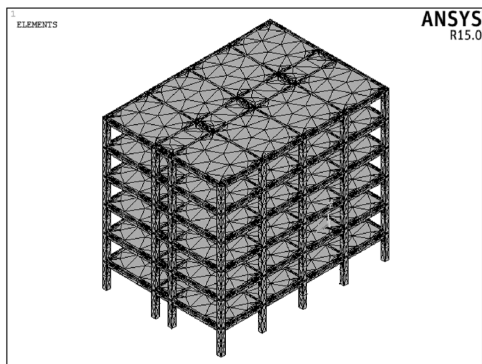


图 14-40　有限元模型

14.2.3 求解

（1）定义分析类型

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，在打开的对话框中选择 Static 选项。

（2）施加约束

选择各立柱与地面接触的面，即 Y=0 的面，施加约束。

通过路径 Utility Menu>Select>Entities 打开 Select Entities 对话框，如图 14-41 所示，第一个下拉菜单选择 Areas 选项，第二个下拉菜单选择 By Location 选项，然后选择 Y coordinates 选项，输入框中输入 0。单击 OK 按钮完成对象的拾取。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas，pick all，单击 OK 按钮，对所有底面施加全部自由度的约束 All DOF，如图 14-42 所示。

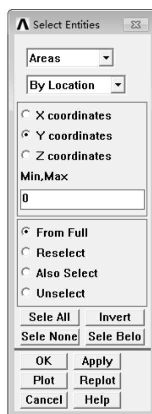


图 14-41　Selection Entities 对话框

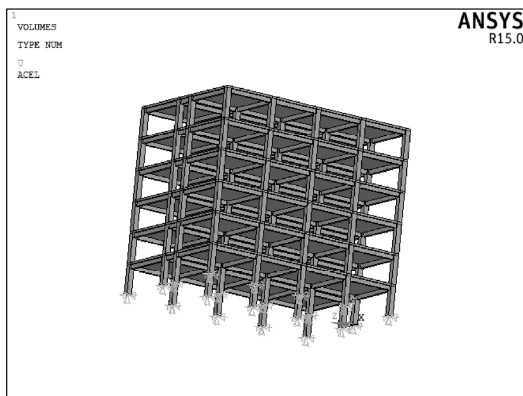


图 14-42　施加地面约束（底面仰视图）

（3）施加重力

首先通过路径 Utility Menu>Select>Everything 选取所有实体。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global 对整体施加重力加速度，在弹出的对话框的 ACEL Y 中输入 10，单击 OK 按钮完成。

（4）通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，开始求解。

本阶段命令流

```
/SOLU                          !进入求解器
ANTYPE，0                      !选择分析类型
ASEL，S，LOC，Y，0
DA，all，ALL，                  !约束所有自由度
ALLSEL，ALL                    !选择所有实体
ACEL，0，10，0，                !施加重力荷载
SOLVE                          !求解
FINISH                         !结束求解器
```

14.2.4 后处理

求解完成，查看计算结果。

（1）显示结构变形

进入一般后处理。通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 可以查看结构变形。

相应的命令流如下：

```
/POST1                         !进入通用后处理
PLDISP，2                      !绘制变形图
```

结构正立面变形图如图 14-43 所示，侧立面变形如图 14-44 所示。

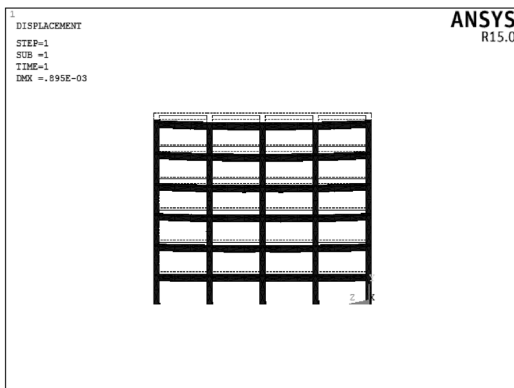


图 14-43 结构正立面变形图

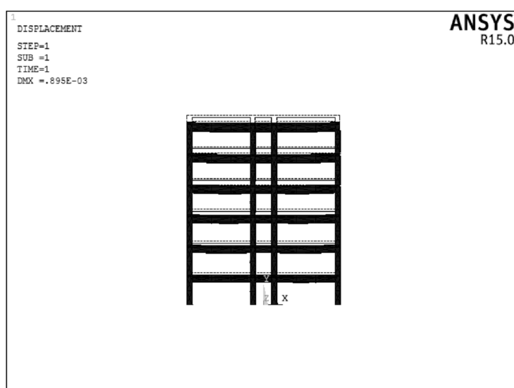
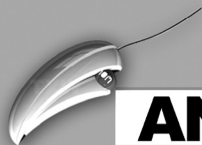


图 14-44 结构侧立面变形图

由图可见，变形主要发生在梁的跨中。最大变形 0.895E-3，变形很小。

变形主要由梁的弯曲挠度和柱子的轴向压缩变形产生，以梁变形为主，柱子的轴向变形相对较小。在跨度较小时，梁的挠度也很小。



（2）位移云图

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 选择 DOF Solution 可以查看位移云图。

相应的命令流如下：

```
PLNSOL，U，Y，0，1                    !绘制 Y 方向位移
PLNSOL，U，SUM，0，1                  !绘制总位移云图
```

得到结构 Y 向位移云图如图 14-45 所示，结构位移总云图如图 14-46 所示。

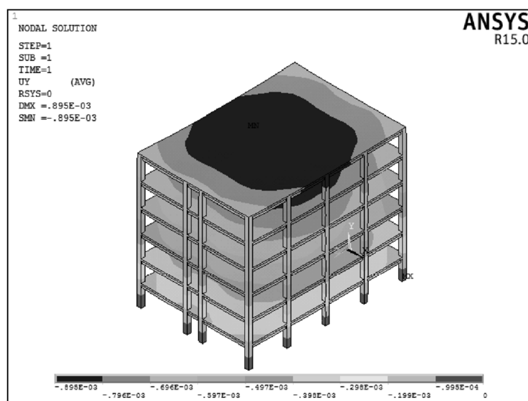


图 14-45　结构 Y 向位移云图

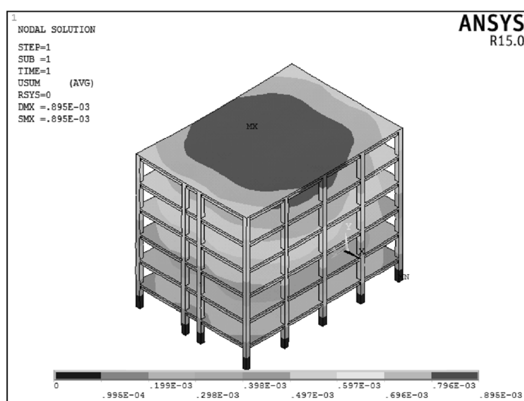


图 14-46　结构位移总云图

（3）显示主应力云图

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 选择 Stress。可以查看 Y 方向应力的云图，如图 14-47 所示。

通过路径 Utility>Plot Ctrls>Device Options，勾选 Vector Mode 和 ON 选项，可以查看应力矢量，如图 14-48 所示。

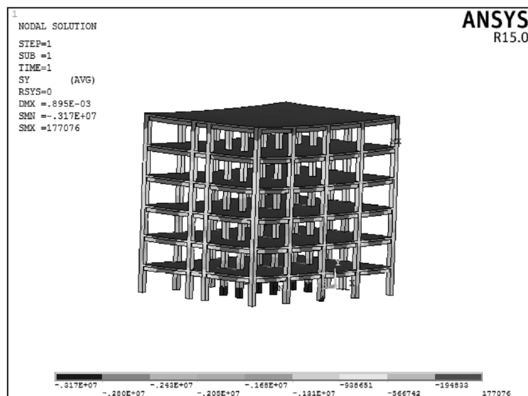


图 14-47　Y 向应力云图

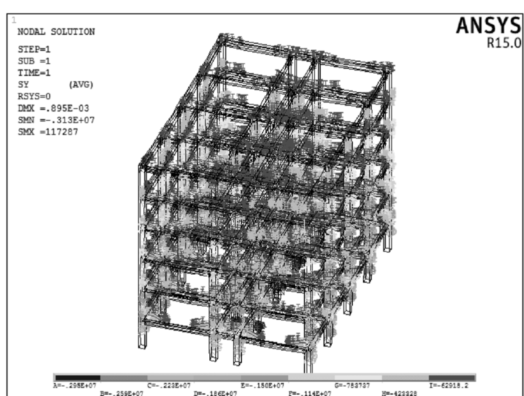


图 14-48　Y 向应力矢量

本阶段命令流：

```
!进入通用后处理模块
/POST1
PLDISP，2                                    !绘制变形图
PLNSOL，U，Y，0，1                            !绘制 Y 方向位移
PLNSOL，U，SUM，0，1                          !绘制总位移云图
!打开矢量开关
/DEVICE，VECTOR，1
PLNSOL，U，Y，0，1                            !Y 方向变形等值线
PLNSOL，S，Y，0，1                            !Y 方向应力等值线
```



14.3 本章小结

本章首先对钢结构排架结构进行了建模及静力分析，通过学习，用户可以掌握钢结构构件的常用单元类型，以及排架结构的建模方法。其后对钢筋混凝土框架结构进行了建模分析。通过实例分析，用户对建模中的复制以及镜像等快捷建模方式应有深刻的理解。

钢结构及钢筋混凝土结构是建筑与土木工程中最常遇到的结构，掌握好这一部分对用户的 ANSYS 实际应用很重要。

第 15 章　膜结构及网壳结构分析

结构体系是指结构抵抗外部作用的构件组成方式。本章将对空间结构体系中常用的膜结构及空间网壳结构体系进行建模分析，以帮助用户熟悉不同结构体系的建模方法。

本章学习目标

- 掌握膜结构的建模方法及找形分析方法。
- 掌握空间网壳结构的循环命令建模方法。

15.1　膜结构

膜结构是 20 世纪中叶发展起来的一种新型大跨度空间结构形式。

膜结构通过施加预应力，使结构具有一定的刚度以承受各种荷载作用，其设计思路和设计步骤与传统结构相比都有很大的不同。

索膜结构用高强度柔性薄膜材料经受其他材料的拉压作用而形成的稳定曲面，能承受一定外荷载的空间结构形式。其具有造型自由、轻巧、柔美，充满力量感，阻燃，制作简易，安装快捷，节能，使用安全等优点，因而它在世界各地得到广泛应用。

15.1.1　相关知识简介

常见的膜结构按结构类型可分为：

- 骨格式膜结构。
- 张拉式膜结构。
- 充气式膜结构。

膜结构按支承条件分类为：

- 柔性支承结构体系。
- 刚性支承结构体系。
- 混合支承结构体系。

膜结构分析的主要过程有：找形分析、承载分析和裁减分析。而在索膜结构设计中，找形分析是至关重要的一个步骤，其目的是确定结构的初始几何形状及应力分布状态。

用 ANSYS 进行膜结构找形分析，先建立平面形状模型，设定很小的弹性模量，利用几何边界条件和给定的应力条件明确平衡曲面，称为第一次找形。

然后将支座固定，进行模型修正，直到膜面应力趋于相等或满足一定的误差位置，得到近似的最小曲面，此为第二次找形。

15.1.2　问题简述

某一悬链面，顶圆半径 a=2.5m，底圆半径 b=27.5m，高 h=7.7224m，膜材料弹性模量为

6000kN/m²，泊松比为 0.38，膜厚为 1mm，膜顶预应力为 18kN/m。其膜结构示意图如图 15-1 所示。

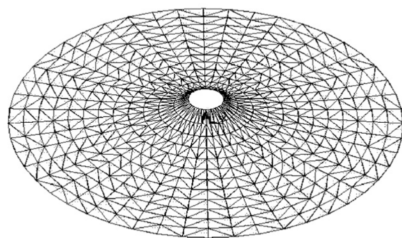


图 15-1 膜结构示意图

15.1.3 前处理

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 Membrane。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

2）定义单元类型。本例中膜结构选用 SHELL181 单元。通过路径 Main Menu> Preprocessor> Element Type>Add/Edit/Delete，单击 Add 按钮添加单元 SHELL181 为 1 号单元。

3）定义材料属性。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。选择对话框右侧 Material Models Available> Structural> Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值 EX 为 6e3，PRXY 为 0.38。

通过路径 Material Models Available> Structural>Thermal Expansion Coef>Isotropic，设置线膨胀系数为 10。

选择 Material Models Available> Structural>Density，输入密度值 7800，单击 OK 按钮完成定义。

4）定义单元截面特性。定义膜的厚度。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections> Shell>Lay-up>Add / Edit，弹出 Create and Modify Shell Sections 对话框，在其中设置 Thickness 为 1e-3，材料 ID 为 1，单击 OK 按钮完成设置。

5）建立模型。先通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Circle>Partial Annulus，在如图 15-2 所示的对话框中输入 Rad-1=2.5，Rad-2=27.5，Theta-2=90。生成 1/4 圆，如图 15-3 所示。

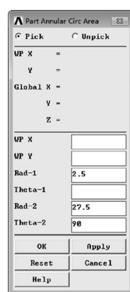


图 15-2 绘制扇形面

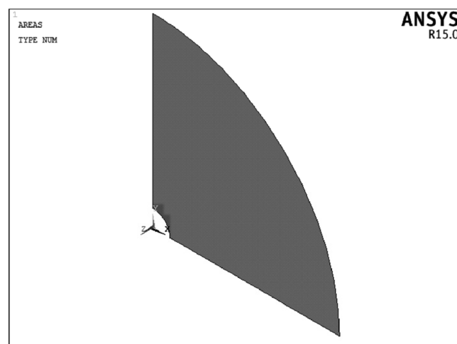


图 15-3 1/4 几何模型

6）划分单元。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>All Areas，为当前的面赋予属性。MAT 选择 1，TYPE 选择 1。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将拾取对象类别设为 Lines，By Length/Rad，选择 Length，输入长度值为 25，单击 OK 按钮完成当前所有径向直线的拾取。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>All Lines，为当前选取的所有直线划分单元尺寸，NDIV 设为 12，表示每条线划分为 12 份。

再次进入 Utility Menu>Select>Entities，选择 invert，单击 OK 按钮。划分为 16 份。进入 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesher Opts，MSHKEY 选择 Mapped。

设置完毕，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>3 or 4 sided 完成网格划分，如图 15-4 所示。

7）对称生成全模型。现在通过对称命令生成全部模型。路径为 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect> Areas。弹出对话框后单击 pick all 按钮拾取全部面，在新弹出的对话框中，设置对称轴为 X，单击 OK 按钮完成 1/2 模型。用同样的方法，将对称轴设为 Y，完成全模型的生成，如图 15-5 所示。

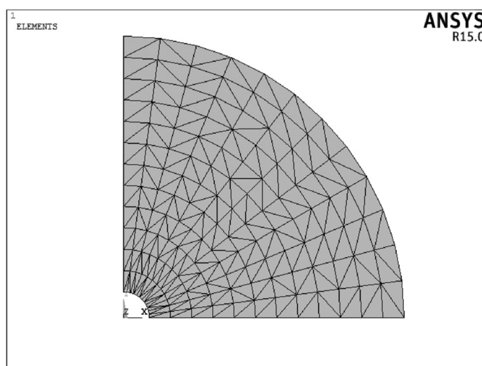


图 15-4　1/4 模型

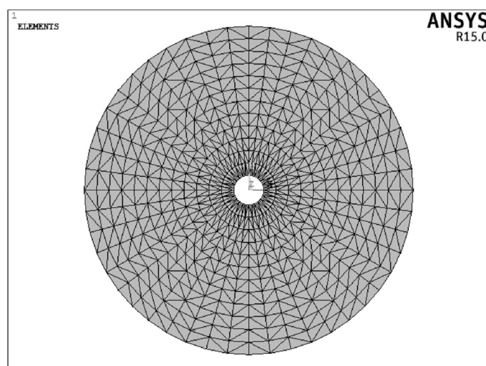


图 15-5　全模型

此时交界部位出现重叠直线及关键点元素，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Merge Items，Label 选择 ALL，合并所有重叠元素。

15.1.4 施加约束及荷载

（1）施加约束

约束底圆周边。通过路径 Utility Menu>Select>Entities 将拾取对象类别设为 Lines，By Length/Rad，选择 Radius，值为 27.5。当前所选对象即为底圆圆周。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines，pick all，拾取底圆圆周，单击 OK 按钮，添加约束 UX，UY，UZ。

约束顶圆周边并施加位移。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将拾取对象类别设为 Lines，By Length/Rad，选择 Radius，值为 2.5。当前所选对象即为底圆圆周。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines，单击 pick all 按钮，拾取顶圆圆周，单击 OK 按钮，添加约束 UX，UY，单击 Apply 按钮；再选择 UZ，在 Value 中填入 7.7224。

（2）施加温度荷载，模拟预应力

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Temperature>On Areas，单击 pick all 按钮，添加温度-0.186。

15.1.5 找形分析

（1）第一次找形分析

进入求解模块，通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，选择 Static，即将分析类型设置为静力分析。

打开路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls，在 Basic 选项卡的 Analysis Options 栏中，选择打开大变形 Large Displacement Static，Number Of Substep 设为 25。

在 Write Items To Results File 中选择 All Solution Items，数据输出频率 Frequency 选择 Write Every Step。设置如图 15-6 所示。

设置完毕，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，开始求解。

求解完毕，在一般后处理中读入求解后的数据，路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>Last Set。此时可得到位移拉伸后的膜结构图，如图 15-7 所示。

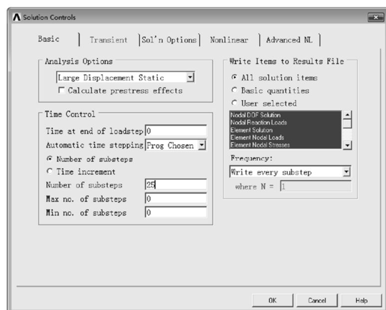


图 15-6 设置求解控制选项

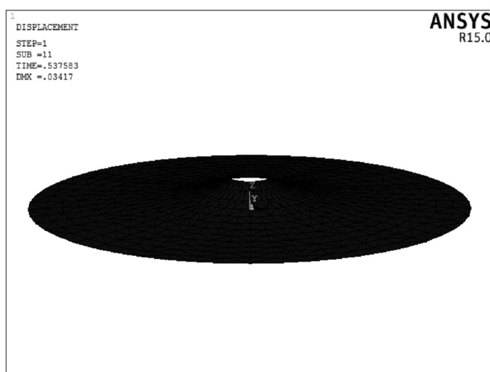


图 15-7 拉伸后的膜结构图

此时由于网格和节点发生位移，需要修正坐标位置。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Other>Updt Node Coord。

第一次找形完成如图 15-8 所示。第一主应力分布为 9655.83～11651.4，范围较大。

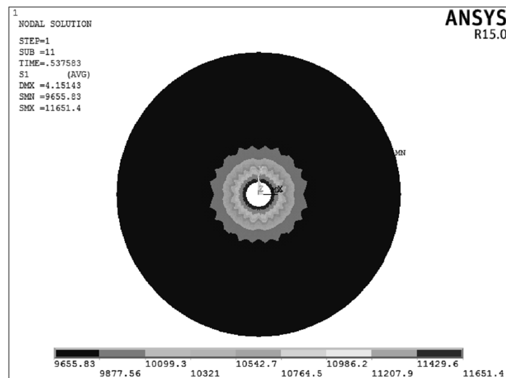


图 15-8 第一次找形后

（2）第二次找形分析

修改约束条件，将提升到位的顶圆边界固定。进行第二次找形分析。

进入求解模块，通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，选择 Static，即将分析类型设置为静力分析。

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将拾取对象类别设为 Lines，By Length/Rad，选择 Radius，值为 2.5。当前所选对象即为底圆圆周。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Lines，单击 pick all 按钮，拾取顶圆圆周，单击 OK 按钮，添加约束 UX，UY，UZ，单击 Apply 按钮。设置完毕，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS，开始求解。

求解完毕，再一次修正坐标位置为 Main Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Other>Updt Node Coord。此时得到的应力分布为 9509.62～9704.74，如图 15-9 所示，分布得相当均匀。变形如图 15-10 所示，为 0.95378m。

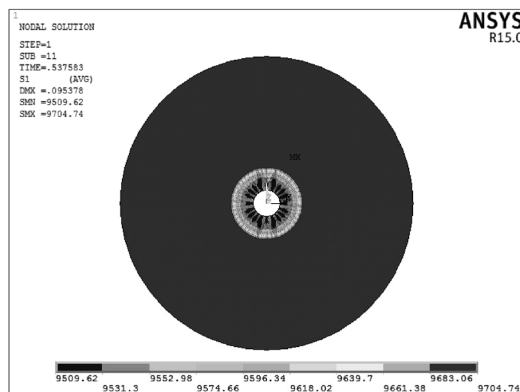


图 15-9 第一主应力

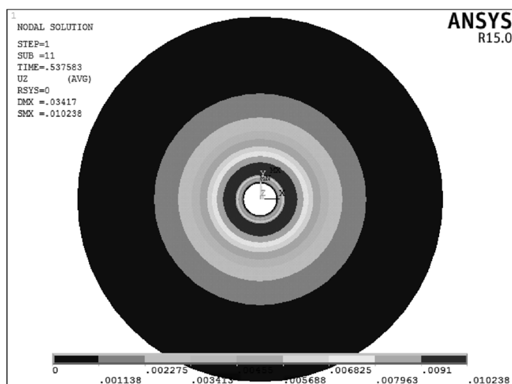


图 15-10 变形云图

通过 APDL 编写循环语句，完成多次计算，以进一步修正模型，APDL 如下。

```
*DO，I，1，20                 !循环开始语句，循环 20 次
/SOLU                         !进入求解模块
SOLVE                         !开始求解
FINISH                        !退出求解模块
/POST1                        !进入一般后处理
SET，LAST                     !读入最后一步运算结果
PLDISP，                      !绘制变形图
FINISH
/PREP7                        !进入前处理模块
UPCOORD，1                    !更新坐标
FINISH
*ENDDO                        !结束循环
FINISH
```

最终，第一主应力云图如图 15-11 所示，变形云图如图 15-12 所示。

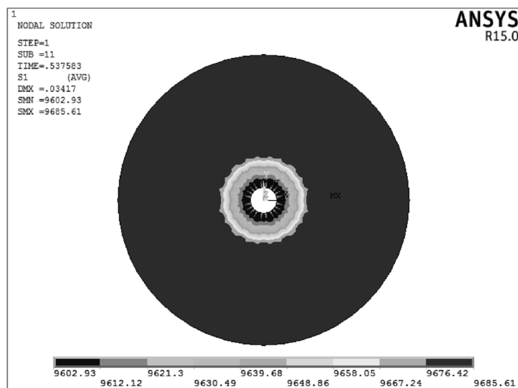


图 15-11 第一主应力云图

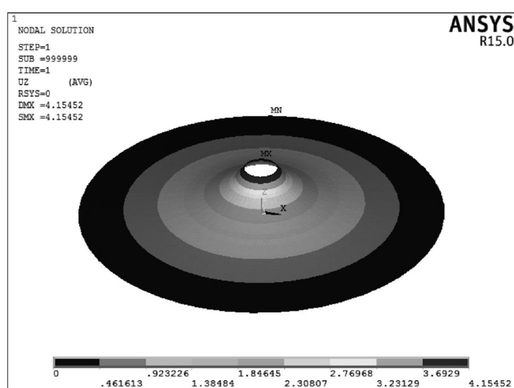


图 15-12 变形云图

经过多次迭代之后，结果更为精确，最终得到应力分布 9602.93～9685.61，变形误差为 0.034312。

15.2 空间单层网壳

网壳结构常见形式有圆柱面网壳、圆球网壳和双曲抛物面网壳。

15.2.1 网壳分类及简介

（1）圆柱面网壳

外形呈圆柱形曲面的网状结构，兼有杆系和壳体结构的受力特点，只在单方向上有曲率，常覆盖矩形平面的建筑。

单层网壳按排列分为 4 种：单向斜杆正交正放网格、交叉斜杆正交正放网格、联方网格、三向网格。

双层网格可参照平板网架的形式布置不同的网格。壳体高度与波长之比一般在 1/6～1/8 之间。双层网壳的厚度宜取波长的 1/20～1/30。

（2）圆球网壳

用于覆盖较大跨度的屋盖，常见网格形式有：肋型、施威德肋型、联方网格、短程线型、三向网格。

通过对壳面的切割，圆球网壳可以用于多边形、矩形和三角形平面建筑的屋盖。

（3）双曲抛物面网壳

将一直线的两端沿两根在空间倾斜的固定导线（直线或曲线）上平行移动而构成。

单层网壳常用直梁作杆件，双层网壳采用直线衍架，两向正交而成双曲抛物面网壳。这种网壳大都用于不对称建筑平面，建筑新颖轻巧。

15.2.2 问题简述

网壳结构主要应对使用阶段的外荷载（包括竖向和水平向）进行内力和位移计算，对单层网壳通常要进行稳定性计算，并据此进行杆件设计。此外，对地震、温度变化、支座沉降

及施工安装荷载，应根据具体情况进行内力、位移计算。

本例分析圆球网壳模型，由钢管构件组成，如图 15-13 所示。

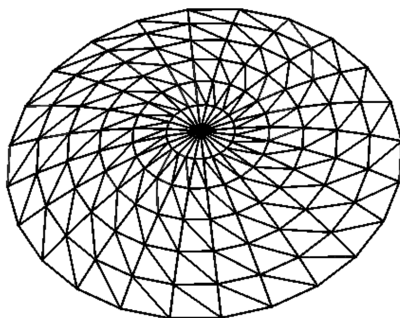


图 15-13　网壳几何图

材料弹性模量为 210GPa，泊松比为 0.3，剪切模量为 80GPa。

环杆与径杆采用空心圆钢管，内径 90mm，外径 92.5mm，斜杆截面内径 80mm，外径 83mm。复杂建模过程通过 APDL 命令流方式完成。

15.2.3 参数设置

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名为 Reticulated Shell。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

2）定义单元类型。本例中结构选用 BEAM188 单元。通过路径 Main Menu> Preprocessor> Element Type>Add/Edit/Delete，单击 Add 按钮添加单元 BEAM188 为 1 号单元。

3）定义材料属性。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Orthotropic 选项，进行正交各项异性参数设置。双击后在对话框输入数值，EX 为 210E9，PRXY 为 0.3，GXY 为 80E9。单击 OK 按钮完成设置。

```
FINISH
/CLEAR
/FILNAME，RETICULATED SHELL                 !文件名
/PREP7                                      !进入前处理
ET，1，BEAM188                              !定义单元为 BEAM188
MP，EX，1，2.1E11                           !材料弹模
MP，PRXY，1，0.3                            !泊松比
MP，GXY，1，8E10                            !剪切模量
```

4）定义单元截面特性。本例需要两种不同的截面形式。环杆与径杆采用同一种截面，而斜杆截面与之不同。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections>Beam>Common Sections，弹出 Beam Tool 对话框，定义截面 ID 为 1，选择截面形状为空心圆管，Ri=0.09，Ro=0.0925，N=36，单击 Apply 按钮完成设置。定义截面 ID 为 2，选择空心圆管截面，Ri=0.08，

Ro=0.083，N=36。单击“OK”按钮完成截面的定义。

本阶段命令流：

```
SECTYPE，1，BEAM，CTUBE，，0              !定义环杆与径杆的界面
SECDATA，0.09，0.0925，36                  !
SECTYPE，2，BEAM，CTUBE，，0              !斜杆截面
SECDATA，0.08，0.083，36
```

15.2.4 建模

根据模型特点，本例直接采用节点——单元建模。由于此处循环命令较多，建模主要使用 APDL 语句。

进入球坐标系建立节点。

执行路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Spherical。

建立节点：

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Nodes>In Active CS。

APDL:

```
CSYS，2                                        !进入球坐标系
FI=5                                           !自定义参数
R=50                                           !
THETA=15                                       !
*DO，I，1，6                                    !生成节点
 *DO，J，1，24，1
 N，24*(I-1)+J，R，(J-1)*THETA，(I-1)*FI+60
 *ENDDO
*ENDDO
N，2000，100，0，90                             !导向节点
```

生成的节点如图 15-14 所示。连接节点生成单元：

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Auto Numbered>Thru Nodes。

```
!环杆和径杆
TYPE，1                                  !设定单元类型为 1 号单元
MAT，1                                   !材料类型为 1 号
SECNUM，1                                !截面类型为 1 号
*DO，I，1，6                              !循环语句生成环杆
 *DO，J，1，23，1
 E，24*(I-1)+J，24*(I-1)+J+1，2000
 *ENDDO
E，I*24，I*24-23，2000
*ENDDO                                   !循环语句生成径杆
*DO，I，1，5
 *DO，J，1，24，1
 E，24*(I-1)+J，24*(I-1)+J+24，2000
 *ENDDO
*ENDDO
N，1000，50，0，90
*DO，I，121，144，1
E，I，1000，2000
*ENDDO                                   !显示节点号
/PNUM，NODE，1                           !绘制单元
```

```
EPLOT
!斜杆                                         !斜杆单元为 1 号
TYPE，1                                       !材料为 1 号
MAT，1                                        !截面类型为 2 号
SECNUM，2                                     !开始生成斜杆单元
*DO，I，1，5                                  !
 *DO，J，1，23，1                             !
 E，24*(I-1)+J，24*(I-1)+J+25，2000           !
 *ENDDO                                       !
E，I*24，I*24+1，2000                         !
*ENDDO                                        !重复单元和点号处理
NUMMRG，ALL                                   !
NUMCMP，ALL
FINISH
```

生成有限元模型细部图如图 15-15 所示。

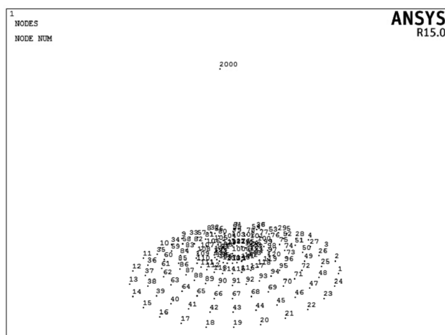


图 15-14　生成所有节点

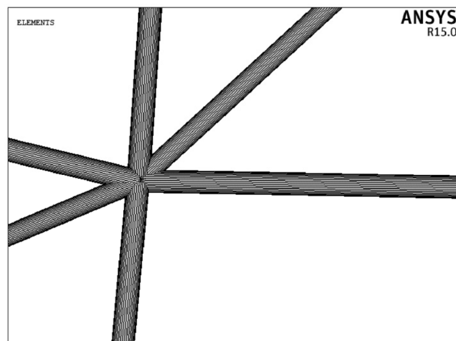


图 15-15　有限元模型细部图

模型整体立面如图 15-16 所示，俯视图如图 15-17 所示。建立完模型后就可以进行结构的特征屈曲分析。

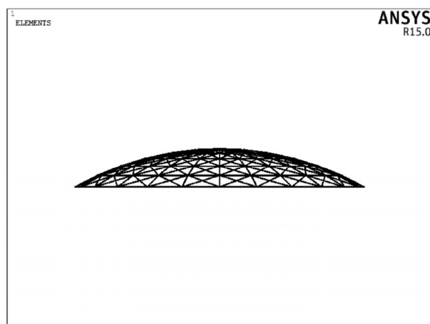


图 15-16　模型立面图

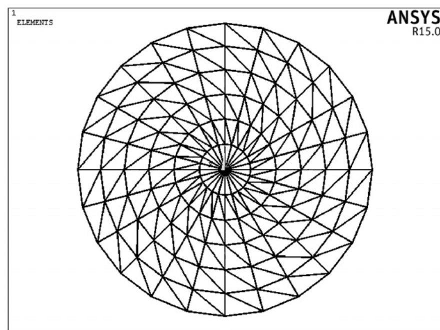


图 15-17　模型俯视图

15.2.5　特征屈曲分析

（1）施加约束

进入求解模块，先通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Global Spherical 将坐标系调为球坐标。拾取网壳最边缘一圈的点将其所有的平动自由度约束。

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将选取对象设为 Nodes，选取方式为 By Location，Zcoordinate，输入坐标值 60，单击 OK 按钮完成。

再通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes，单击 pick all 按钮，对所有当前节点施加约束。自由度选择 UX，UY，UZ，Value=0。约束情况如图 15-18 所示。

相应命令流如下：

```
/SOLU                          !进入求解模块
CSYS，2                        !设置当前坐标系为球坐标系
NSEL，S，LOC，Z，60            !选择外圈节点
NPLOT                          !绘制当前选择的节点
D，ALL，UX                     !约束当前节点的自由度
D，ALL，UY                     !
D，ALL，UZ                     !
ALLSEL                         !
```

（2）对节点施加微小扰动力

通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将选取对象设为 Nodes，选择 From Full 选项，单击 Apply 按钮；再选取方式为 By Location，Zcoordinate，输入坐标值 60，勾选 Unselected 选项，单击 OK 按钮，完成节点选取。

此时选择了除最外圈以外的所有节点。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply> Structural>Force/Moment>On Nodes，单击 pick all 按钮，施加 FZ= -1。施加完扰动力的模型如图 15-19 所示。

施加扰动力的命令流如下：

```
EPLOT                          !绘制单元
NSEL，U，LOC，Z，60            !不选择外圈节点
NPLOT                          !
F，ALL，FZ，-1                 !施加微小扰动力
```

通过路径 Utility Menu>Select> Everything 选择所有实体，之后开始求解 Main Menu> Solution> Solve>Current LS。

命令：

```
SOLVE
```

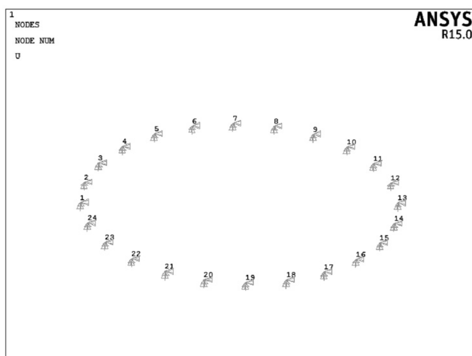


图 15-18 约束周边

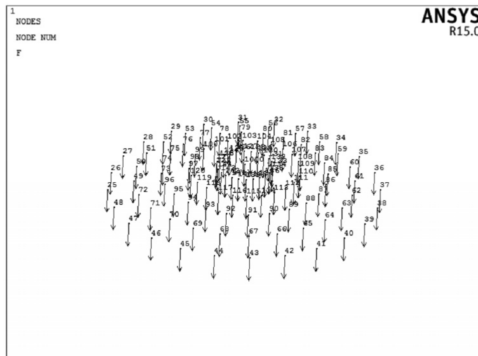


图 15-19 对网壳施加微小扰动力

约束和荷载总图如图 15-20 所示。分析后的变形趋势如图 15-21 所示。此时变形值极小，为 0.277E-5m。

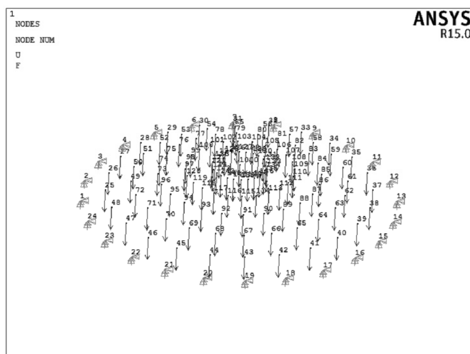


图 15-20 约束和荷载总图

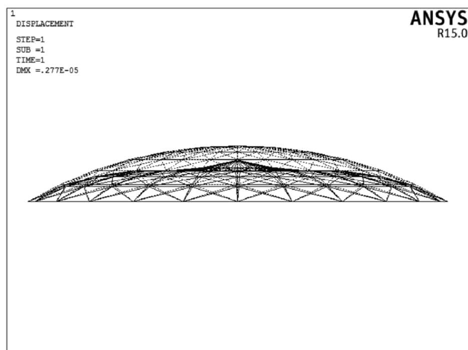


图 15-21 微小扰动下的变形趋势图

求解后得到网壳的初始状态。

现在进行特征值屈曲分析。进入求解模块，通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis 设置分析类型为 Eigen buckling。

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options 设置求解项，Nmode=3，即设置提前的模态为前三阶。通过路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>ExpansionPass>Single Expand> Expand Modes，将扩展模态数同样设置为 3。

设置完毕后进行求解 Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

命令流如下：

```
                                    !
/SOLU                               !特征值屈曲分析
ANTYPE，BUCKLE                      !分析模态阶数
BUCOPT，SUBSP，3                    !扩展阶数
MXPAND，3                           !求解
SOLVE
FINISH
```

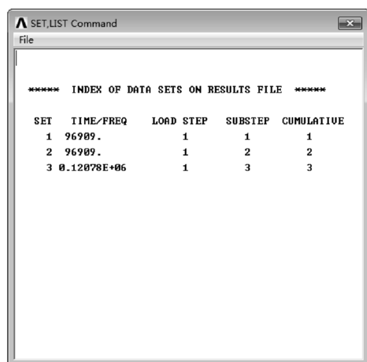
（3）屈曲分析结果

通过路径 Main Menu>General Postproc>Results Summary，得到分析结果的数据信息列表，如图 15-22 所示。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>First Set 提取第一组数据，再通过 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 得到第一阶模态的变形图，如图 15-23 所示。

相应的命令流如下：

```
/POST1                              !进入一般后处理
SET，LIST                           !读入数据列表
SET，FIRST                          !读入第一组数据
PLDISP，0                           !绘制变形图，下同
```


SET,LIST Command
File

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	96909.	1	1	1
2	96909.	1	2	2
3	0.12078E+06	1	3	3

图 15-22 数据信息列表

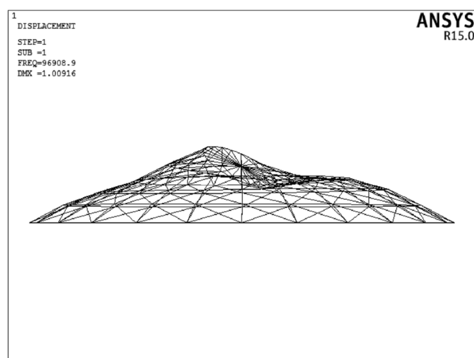


图 15-23 第一阶模态

通过路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>Next Set，调入下一组数据，再通过 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 得到第二阶模态的变形图，如图 15-24 所示。

用同样的方法可得到第三阶模态的变形图，如图 15-25 所示。

读取下一组数据的命令流如下：

```
SET，NEXT        !第二阶
PLDISP，0
SET，NEXT        !第三阶
PLDISP，0
```

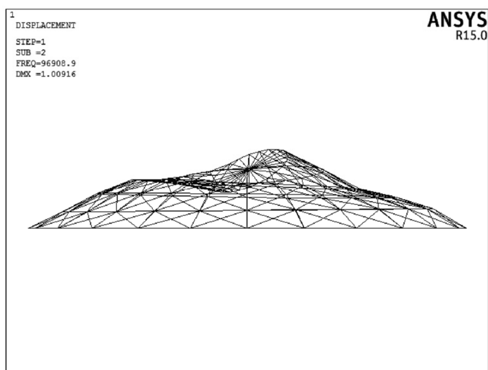


图 15-24 第二阶模态

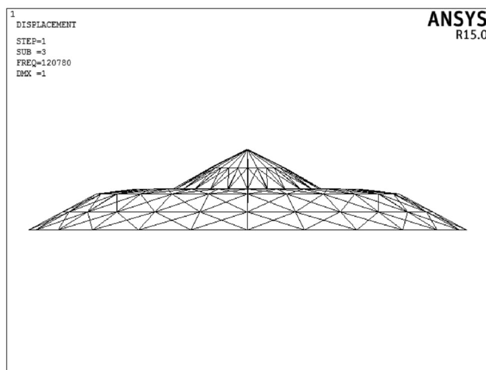


图 15-25 第三阶模态

分析结束。

15.2.6 非线性分析

用同样的模型，对其进行非线性分析。为了避免出错，且便于整理，建议用户实际工作中进行完全独立的分析。本例中删除模型的扰动力，进行重新分析。

1）单击 SAVE_DB 保存数据。

2）删除旧的荷载条件。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Delete>All Load

Data>All Forces>On All Nodes，删除所有外荷载数据。重新进入分析模块进行非线性分析。

3）求解微小扰动下的初始状态。

● 设置求解项

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置求解类型为 Static。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Loads>Analysis Type>Analysis Options，勾选 NLGEOM 选项，将大变形分析激活。

● 施加初始扰动

对节点施加微小的侧向扰动力。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural> Force/Moment>On Nodes，在 Apply F/M on nodes 对话框的 min，max.inc 栏下输入节点号 145，单击 OK 按钮。在弹出的对话框内 Lab 选择 FY，VALUE 输入-1000，单击 OK 按钮完成侧向干扰力的施加。

● 开始初状态求解

完成以上设置，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 开始求解。

4）施加外荷载并求解。初始状态求解结束后，进入求解模块重新设置求解项。通过路径 Main Menu>Solution> Analysis Type>Sol'n Controls，在 Basic 选项卡中设置分析子步数为 200 步；在 Basic 选项卡右侧的结果输出设置中，选择输出数据为 All solution items，输出频率为 Write every substep。在 Advanced NL 选项卡中，激活弧长法。

施加外荷载。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，将选取对象设为 Nodes，选择 From Full，单击 Apply 按钮；再选取方式为 By Location，Zcoordinate，输入坐标值 60，勾选 Unselected 选项，单击 OK 按钮，完成节点选取。此时选择了除最外圈以外的所有节点。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes，pick all，施加 FZ=-50000。

完成以上设置，通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 开始求解。

5）一般后处理。求解结束后，进入一般后处理查看分析结果。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape 查看变形图，如图 15-26 所示。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu 查看 Z 向变形，如图 15-27 所示。

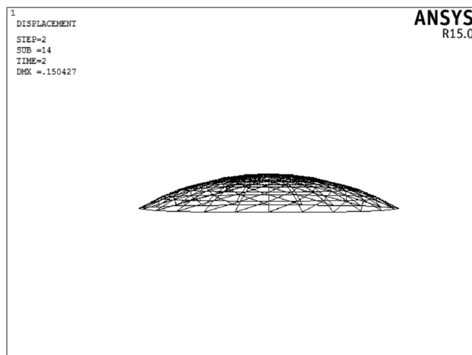


图 15-26　变形图

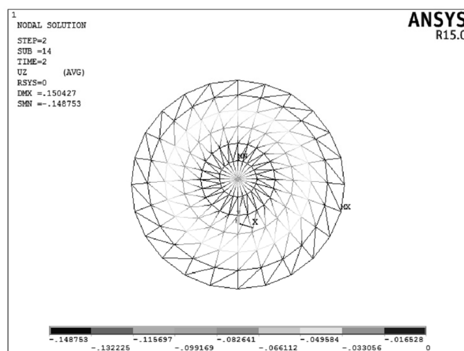


图 15-27　Z 向变形云图

通过 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table 定义单元列表，单击 Add

按钮，Lab 填入 FI，By sequence num，下一栏填入 SMISC，1，单击“OK”按钮完成第一个轴力单元列表的定义。再添加第二个单元列表，Lab 填入 FJ，By sequence num，SMISC，7；添加弯矩单元列表，Lab=MI，By sequence num，下一栏填入 SMISC，6；Lab= MJ，By sequence num，下一栏填入 SMISC，12。完成定义。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Line Elem Res，LabI 选择 FI，LabJ 选择 FJ，考虑模型网线的密度，Fact 填入 0.5，单击 OK 按钮完成设置，此时得到网壳各杆轴力图，如图 15-28 所示。

用同样的方法，在 LabI 选择 MI，在 LabJ 选择 MJ，则可得到弯矩图，如图 15-29 所示。

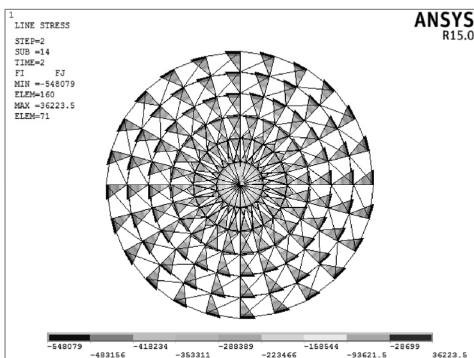


图 15-28 轴力图

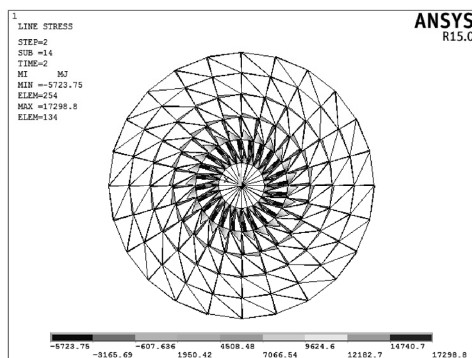


图 15-29 弯矩图

6）时间历程后处理。通过路径 Main Menu>TimeHist Postpro 得到窗口，如图 15-30 所示。



图 15-30 时间历程变量查看窗口

单击左上的绿色十字，添加变量。以添加顶点为例，单击 ADD DATA 按钮，打开 Add Time-History Variable 对话框，如图 15-31 所示，依次选择 Nodal Solution> DOF Solution>Z-Comonent of displacement，单击 OK 按钮，完成添加。在这个对话框中可以进行坐标图中变量的切换选择等很多操作。

用户也可以通过路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Define Variables 单独进行需要的数据的变量添加，如图 15-32 所示。本例中添加网壳上不同高度沿同一坡向的一系列节点：

N145，N121，N97，N73；通过路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Math Operations>Multiply 继续添加荷载数据。

通过路径 Main Menu>TimeHist Postpro>Graph Variables，填入相应的变量号，（一次最多 10 个），即可在同一坐标图中显示多个变量。用户同样可在图 15-30 所示的窗口拉选多个变量进行绘图。

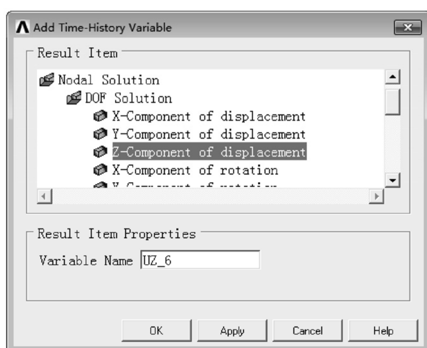


图 15-31　Add Time-History Variable 对话框

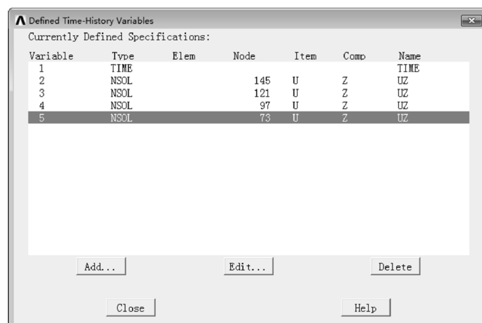


图 15-32　定义变量对话框

变量定义完毕，通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Style>Graphs>Modify Axes 设置曲线图的 X 轴、Y 轴。

用户可根据需要，自行选择所需要绘制的坐标曲线图。

时间历程后处理部分结果展示：

设置 TIME 为 X 轴，LOAD 为 Y 轴，得到如图 15-33 所示的荷载-时间曲线。设置 LOAD 为 X 轴，变量 2 为 Y 轴，得到顶点 N145 与荷载 LOAD 的相对曲线，如图 15-34 所示。

荷载随时间的变化是线性的。而顶点的位移随着荷载或时间的变化则是非线性的，随着荷载的增大或时间的延长，其曲线斜率的绝对值变小，即变形速度减慢。

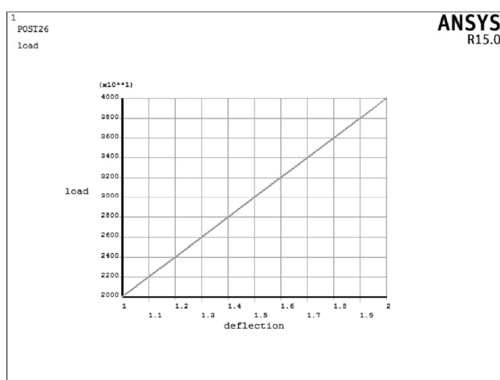


图 15-33　荷载-时间曲线

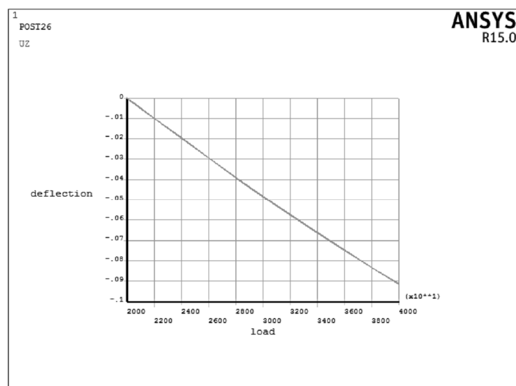


图 15-34　荷载-顶点变形曲线

设置 LOAD 为 X 轴，变量 2、3、4、5 为 Y 轴，得到各变量取值点与荷载 LOAD 的相对曲线，如图 15-35 所示。

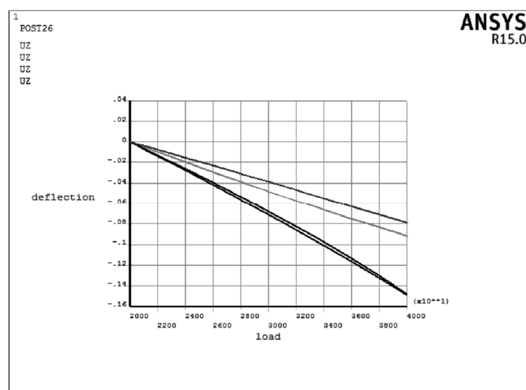


图 15-35　各点变形对比

由图可见，离顶端越近的点变形越明显，顶端最大位移为 0.09m。

15.3　本章小结

本章重点对膜结构的建模以及找形进行了分析，重点是找形分析的概念以及分析方法。

本章最后对大型空间网壳结构进行了建模及分析。通过对本例的学习，用户应该掌握了复杂模型的建模方法、结构特征屈曲分析以及非线性分析的具体操作流程。

第 16 章　基础工程分析

基础工程是指采用工程措施，改变或改善基础的天然条件，使之符合设计要求的工程。本章将就房屋建筑中最常见的刚性独立基础，以及考虑摩擦接触的桩基础进行工程分析。

本章学习目标

- 掌握刚性独立基础的建模方法。
- 掌握旋转体的建模方法。
- 掌握接触单元的使用方法以及摩擦桩的建模方法。

16.1　房屋刚性独立基础

房屋独立基础为普通低层房屋常用的基础类型。

16.1.1　独立基础

当建筑物上部结构采用框架结构或单层排架结构承重时，基础常采用方形、圆柱形和多边形等形式的独立式基础，这类基础称为独立式基础，也称单独基础，是整个或局部结构物下的无筋或配筋基础，一般是指结构柱基、高烟囱、水塔基础等的形式。

独立基础分阶形基础、坡形基础、杯形基础 3 种。

16.1.2　问题简述

本例为一坡形基础，几何形状如图 16-1 所示。

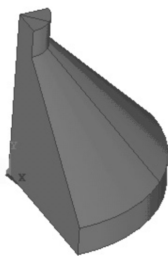


图 16-1　坡形独立基础

（1）几何参数

基础底部面为直径 3m 的圆形，全高 1.8m，上部平台为直径 0.6m，斜坡坡高 1.2m，坡角 45°，截面形状为圆形。

（2）单元及材料参数

单元选用 SOLID65，为方便建模，创建 PLANE182 单元作为过渡性辅助单元。

桩体材料：线弹性材料，弹性模量 25GPa，泊松比 0.2，密度 2700kg/m^3。

土体材料：DP 材料，弹性模量 25MPa，泊松比 0.45，密度 2000kg/m^3。粘聚力 c 为 10，摩擦角为 30°，膨胀角为 30°。

16.1.3 前处理

本例采用 APDL 方式进行分析。

（1）定义单元类型及材料属性

```
FINISH                          !
/CLEAR                          !
/PREP7                          !进入前处理
ET，1，PLANE182                 !定义过渡单元
ET，2，SOLID65                  !定义最终材料单元
MP，EX，1，2.5E10               !桩的弹性模量
MP，NUXY，1，0.2                !桩的泊松比
MP，DENS，1，2700               !桩的密度
MP，EX，2，2.5E7                !土的弹性模量
MP，NUXY，2，0.45               !土的泊松比
MP，DENS，2，2000               !土的密度
TB，DP，2                       !定义 DP 参数
TBDATA，1，10，30，30           !粘聚力 C 为 10，摩擦角为 30°，膨胀角为 30°
```

（2）建立平面模型

```
                                !建立模型关键点
K，1
K，2，1.5
K，3，1.5，0.3
K，4，0.3，1.5
K，5，0.3，1.8
K，6，0，1.8
K，7，1.5，1.8
K，8，3，1.8
K，9，3，0
K，10，3，-2                    !连接关键点生成直线
K，11，0，-2
*DO，I，1，5
L，I，I+1
*ENDDO
L，1，6
L，3，7
L，5，7
*DO，I，7，10
L，I，I+1
*ENDDO
L，2，9
L，11，1                        !显示直线编号，以便生成面
/PNUM，LINE，1                  !绘制直线
LPLOT                           !通过线围成基础的面
AL，1，2，3，4，5，6            !生成土体面
AL，3，4，8，7
AL，2，7，9，10，13
AL，1，13，11，12，14
/PNUM，AREA，1                  !显示面
```

```
APLOT                                          !粘贴各部分
AGLUE，ALL
NUMMRG，ALL
NUMCMP，ALL
```

生成几何模型如图 16-2 所示。

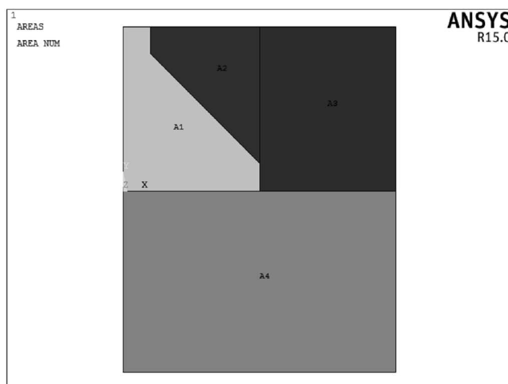


图 16-2　平面几何模型

下面进行网格划分，将其转换成有限元模型。

```
!划分单元
LSEL，S，，，2，8，1                          !选择直线 L2～L8
LSEL，U，，，3                                !在 L2～L8 中去除 L3
LESIZE，ALL，0.15                             !设定直线划分单元的尺寸
LSEL，S，，，3                                !选择 L3
LESIZE，ALL，，，10                           !划分为 10 份
LSEL，S，，，ALL                              !反选 L2～L8
LSEL，U，，，2，8，1
LESIZE，ALL，0.15                             !设置其余各直线划分尺寸
AMESH，1，4                                   !划分面
```

划分生成的有限元面模型如图 16-3 所示。

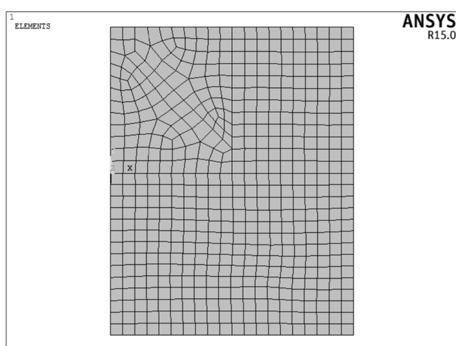


图 16-3　划分后的面

现在进行面的旋转操作，将其生成柱体。

注意：SOLID 单元不能进行 AMESH 操作，因此之前一直采用的是 PLANE 单元。

在拉伸操作中，要设置拉伸后的生成单元类型，借助这种方式，可以将最终的立体模型变化为 SOLID65 单元。

```
EXTOPT，ESIZE，3，0，                      !设置拉伸单元份数
EXTOPT，ACLEAR，1                          !拉伸后清除多余面
TYPE，2                                    !拉伸后采用 SOLID65 单元
MAT，1
VROTAT，1，，，，，，，6，11，-90，2        !将 A1 沿 K6，K11 所在轴负向旋转 90°
TYPE，2                                    !重新定义单元及材料属性
MAT，2
VROTAT，2，3，4，，，，6，11，-90，2        !将 A2～A4 沿 K6，K11 所在轴负向旋转 90°
NUMMRG，ALL                                !重复单元的合并
NUMCMP，ALL                                !编号的压缩重排
ALLSEL
/VIEW，1，1，1，1
EPLOT
```

旋转后生成有限元模型。

基础模型如图 16-4 所示，包括地基土的 1/4 模型如图 16-5 所示。

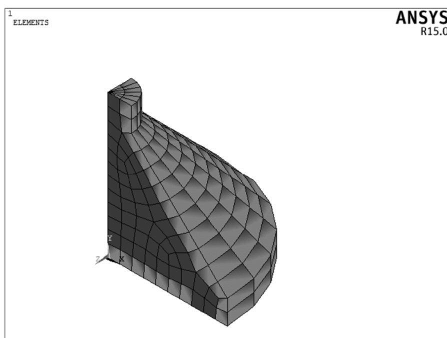


图 16-4　基础模型

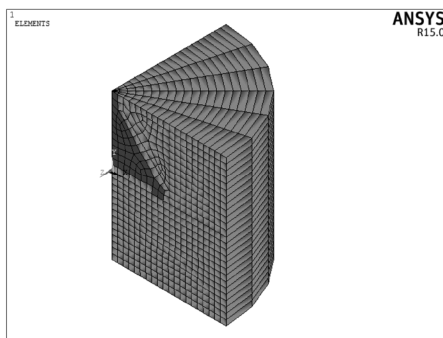


图 16-5　1/4 模型

16.1.4 加载及求解

（1）施加约束

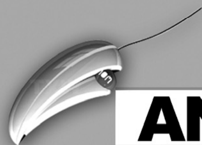
本例在图 16-5 的整体模型上，对称面 X=0 和 Z=0 处施加对称约束。

模型底面 Y=-2 施加 Y 方向自由度约束。顶面为自由面，其余 3 个侧面约束其 UX、UZ 的平动自由度。

对称面及底面约束情况如图 16-6 所示。外侧立面约束如图 16-7 所示。

具体约束命令如下：

```
/SOLU                                      !进入求解模块
!施加对称约束
ASEL，S，LOC，X，0                         !选择 X=0 的面
ASEL，A，LOC，Z，0                         !选择 Z=0 的面
DA，ALL，SYMM                              !施加对称约束
!约束底面
ASEL，S，LOC，Y，-2
DA，ALL，UY
```



```
!施加水平方向约束
ASEL，S，，，21，31，10
ASEL，A，，，24，34，10
DA，ALL，UX
DA，ALL，UZ
```

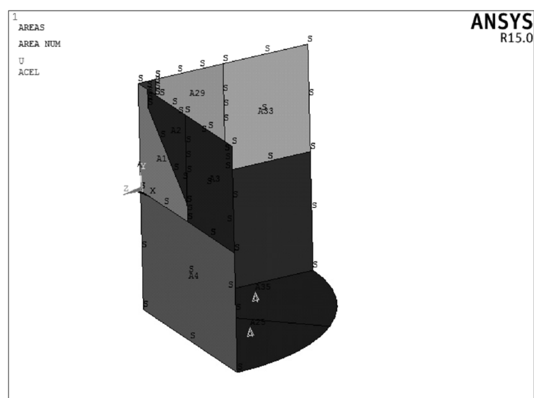


图 16-6　对称面及底面约束

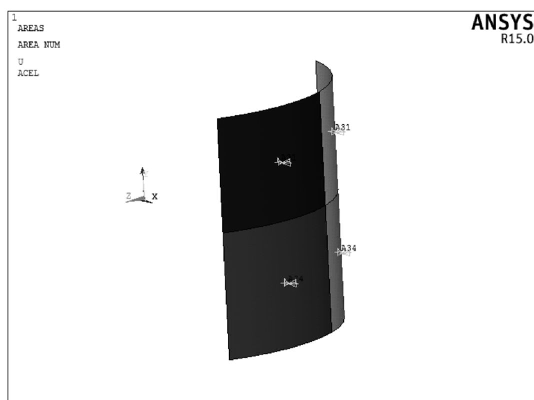


图 16-7　外侧面约束

（2）施加重力荷载

模型受荷载分两步，第一步为受重力荷载，第二步添加上部传递到基础顶面的荷载。先进行第一步分析。

```
ALLSEL                      !拾取所有实体
ACEL，0，9.8，0              !施加沿 Y 轴重力加速度
SOLVE                       !求解
FINISH
```

进行后处理时，选择 FIRST SET 即可查看本步结果。

（3）施加上部荷载

```
/SOLU                        !重新进入求解模块
ASEL，S，，，9，15，6         !选择基础顶面
SFA，ALL，4，PRES，，50000    !对面施加压力
!设置求解项
ANTYPE，STATIC               !分析类型为静力分析
TIME，1                      !加载时间 1s
NSUB，100                    !荷载子步数 100
OUTRES，ALL，ALL             !结果输出设置
ALLSEL                       !
GPLOT                        !绘图设置
SOLVE                        !开始求解
FINISH                       !
```

施加荷载效果如图 16-8 所示。

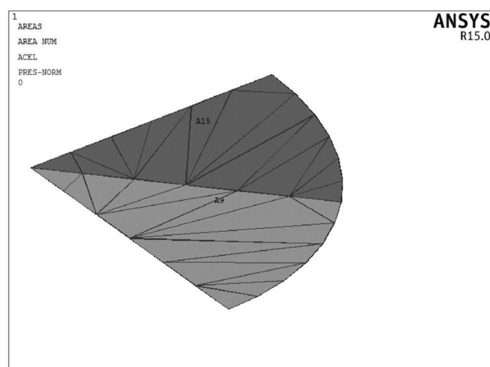


图 16-8　施加面荷载

16.1.5 后处理

（1）自重荷载下的受力及变形

```
/POST1                              !进入一般后处理
SET，FIRST，FIRST                   !读取第一子步数据
PLNSOL，U，Y                        !绘制 Y 方向位移云图
PLNSOL，S，Y，0，1                  !绘制 Y 方向应力云图
PLNSOL，S，EQV，0，1                !等效应力云图
/PBC，ALL，，0                      !进行边界及支反力的显示操作
/PBC，NFOR，，1                     !
/PBC，NMOM，，1                     !
/PBC，RFOR，，1                     !
/PBC，RMOM，，1                     !
/PBC，PATH，，1
```

得到各结果，沉降分布云图如图 16-9 所示，Y 方向应力云图如图 16-10 所示。

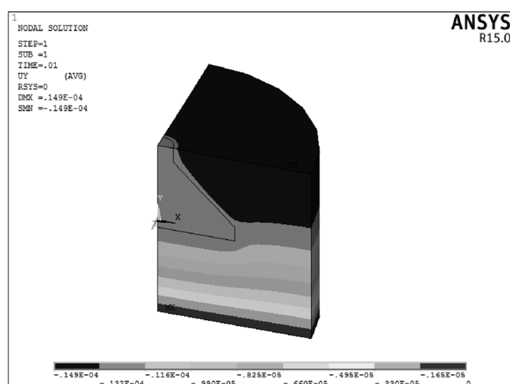


图 16-9　自重荷载下的沉降分布云图

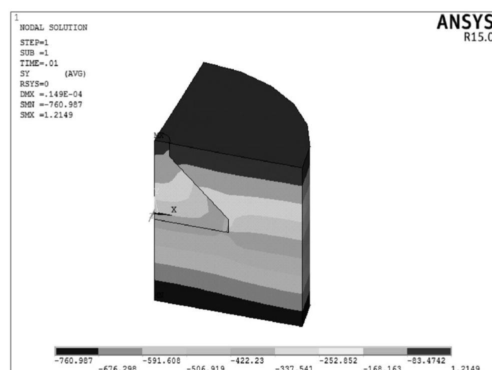


图 16-10　自重荷载下 Y 方向应力云图

自重荷载下沉降值很小，UY=-0.149E-4m。自重应力最大值为压应力，大小为 SY=760.987Pa。

得到自重荷载下的等效应力如图 16-11 所示，支反力分布如图 16-12 所示。

图 16-11　自重荷载下的等效应力

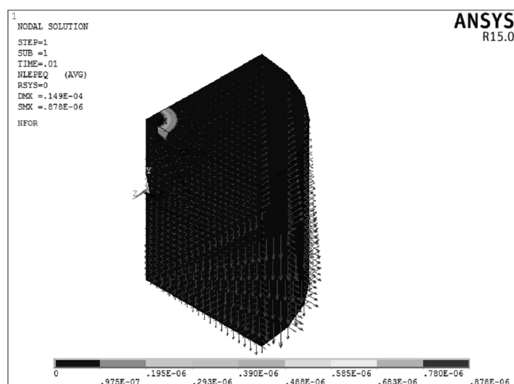


图 16-12　支反力分布

（2）施加荷载后的最终计算结果

读入最后一个计算步的数据，即得到了最终的计算结果。命令如下：

```
SET，LAST                              !读取最后一步的数据
PLNSOL，U，Y                           !Y 方向位移云图
PLNSOL，S，Y，0，1                     !Y 方向应力云图
PLNSOL，S，EQV，0，1                   !等效应力
PLNSOL，NL，EPEQ，0，1                 !累计塑性变形云图
```

最终沉降分布如图 16-13 所示，Y 方向应力分布如图 16-14 所示。

图 16-13　最终沉降分布图

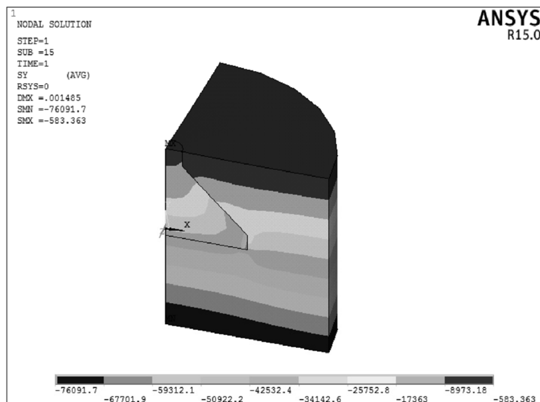


图 16-14　Y 方向应力分布

上部荷载下沉降值很小，UY=−0.01485m。

应力最大值为压应力，大小为 SY=76091.7Pa。地表一层土由于基础的下陷，产生了拉应力。

等效应力云图如图 16-15 所示，累计塑性应变云图如图 16-16 所示。

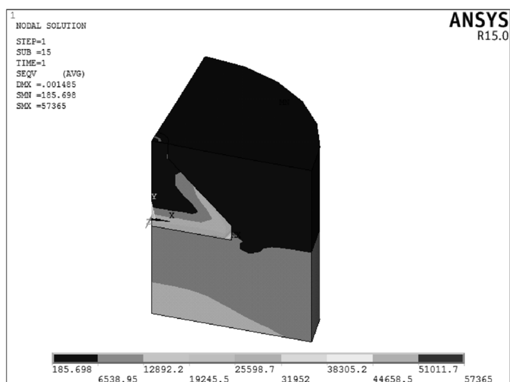


图 16-15　等效应力云图

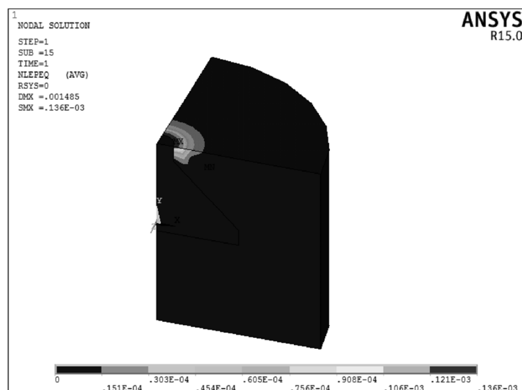


图 16-16　累计塑性应变云图

由等效应力云图可以清晰地看出，放大角边缘点和顶点边缘处最容易发生塑性变形。

（3）查看上部荷载单独影响

用户也可以通过对不同荷载步的计算结果的操作，单独查看外荷载的影响。

```
LCDEF，1，1，1，                    !将第一个子步定义为荷载工况 1
LCDEF，2，1，15                     !第 15 步为工况 2
LCASE，2                            !调入第 2 工况
LCOPER，SUB，1                      !减去第 1 工况
PLNSOL，U，Y                        !绘制 Y 向位移云图
PLNSOL，S，Y，0，1                  !绘制 Y 向应力
```

上部荷载产生的位移如图 16-17 所示，上部荷载产生的应力如图 16-18 所示。

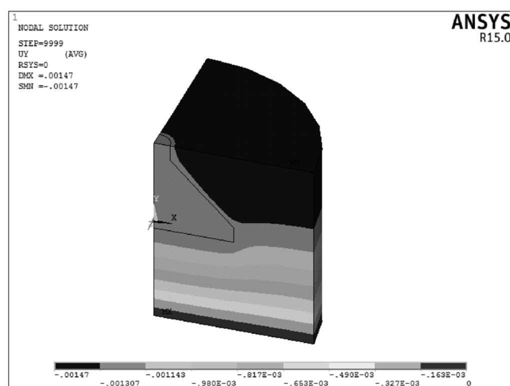


图 16-17　上部荷载产生的位移

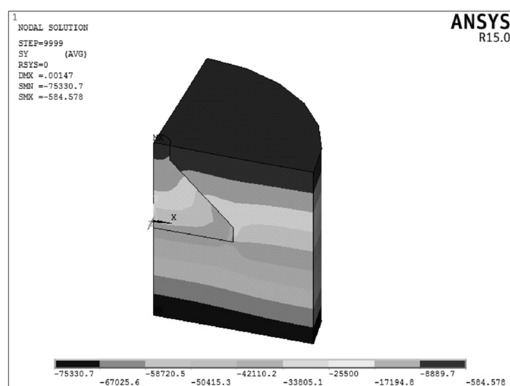


图 16-18　上部荷载产生的应力

本节主要以命令流为主进行了建模及分析。其方便性相信读者已深有体会。

16.2　考虑接触单元桩基分析

摩擦桩是完全设置在软弱土层一定深度的一种桩，上部结构荷载要由桩尖阻力和桩身侧面与土之间的摩擦力共同来承担。

本例考虑桩土相互作用进行桩基础的建模与分析。

16.2.1 问题简述

摩擦型桩可分为摩擦型桩和端承摩擦型桩。桩端阻力可忽略时称为摩擦桩，桩端阻力不可忽略时称为端承摩擦桩。

同理，端承型桩也可分为端承桩和摩擦端承桩，桩侧阻力可忽略时称为端承桩，桩侧阻力不可忽略时称为摩擦端承桩。

本节以一混凝土方桩为例，考虑桩土摩擦进行分析计算。

（1）几何参数

桩长 8m，断面尺寸 2m×2m，入土深度 6m。

（2）材料特性及参数

- 桩为线弹性材料

弹性模量 25GPa，泊松比 0.2，密度 2500kg/m^3。

- 土体采用 DP 材料

弹性模量 0.25GPa，泊松比 0.4，密度 2000kg/m^3。

粘聚力为 19，摩擦角为 32°，膨胀角为 30°。

（3）对于接触分析模型

模型采用 1/2 剖面，土体和桩单元为 SOLID65。对桩身与土体的作用进行接触分析，桩身本构关系采用线弹性，而土体本构采用 DP 模型。

接触面上的刚体目标面为 TARGE170，接触面为 CONTA173 单元。

16.2.2 单元及材料属性设定

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 Friction Pile。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

2）定义单元类型。本例中土体和状体选用 SOLID65 单元。为了建模时可以使用拉伸功能，先定义辅助单元 PLANE182，通过路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type> Add/Edit/Delete，单击 Add 按钮添加单元 PLANE182 为 1 号单元，SOLID65 设为 2 号单元。

命令流如下：

```
/PREP7
ET，1，PLANE182
ET，2，SOLID65
```

3）定义桩体材料属性。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，EX：25E9；PRXY：0.2；在 Material Models Available> Structural> Density 中设定材料密度 2500。单击 OK 按钮完成设置。

桩的设定命令流如下：

```
MP，EX，1，2.5E10                  !桩的弹性模量
MP，NUXY，1，0.2                   !桩的泊松比
MP，DENS，1，2500                  !桩的密度
```

4）定义土体材料。打开路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

先设定弹性参数。选择对话框右侧 Material Models Available> Structural> Linear> Elastic> Isotropic 选项。双击后在对话框输入数值，EX：0.25E9；PRXY：0.4；在 Material Models Available> Structural>Density 中设定材料密度 2000。单击 OK 按钮完成设置。

土的弹性参数命令流如下：

```
MP，EX，2，2.5E8                    !土的弹性模量
MP，NUXY，2，0.4                    !土的泊松比
MP，DENS，2，2000                   !土的密度
```

设定摩擦系数。选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Friction Cohesion，输入 MU=0.2。

设定 DP 参数。选择对话框右侧 Material Models Available>Structural> Nonlinear> Inelastic> Non-metal Plastic>Drucker-Prager，依次输入 Cohesion=19，Fric Angle=32，Flow Angle=30。

命令流如下：

```
TB，DP，2
TBDATA，1，19，32，30          !粘聚力 C 为 19，摩擦角为 32°，膨胀角为 30°
```

16.2.3 建模

（1）建立平面几何模型

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By Dimensions，生成模型各部分几何体。

在弹出的对话框中输入 X1，X2=0，1；Y1，Y2=0，8。单击 OK 按钮生成桩的平面几何模型。同样的方式，输入 X1，X2=1，5；Y1，Y2=0，6，生成桩侧土体。输入 X1，X2=0，5；Y1，Y2=0，−16，生成桩下土体。

相应命令为 RECTING，具体使用方法如下：

```
RECTNG，0，1，0，8，                 !生成面 1
RECTNG，1，5，0，6，                 !生成面 2
RECTNG，0，5，0，−16，               !生成面 3
```

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Glue>Areas，拾取 a2，a3 两个土体部分，将其粘合。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Compress Numbers 对重叠元素压缩编号。生成模型如图 16−19 所示。

相关命令流如下：

```
/PNUM，AREA，1                 !显示面编号
/PNUM，LINE，1                 !显示线编号
ASEL，S，，，2，3，1           !选择面
AGLUE，ALL                     !粘合面
NUMCMP，ALL                    !压缩编号
ALLSEL                         !
APLOT                          !
```

注意：此处不可将 a1 粘合，否则无法进行接触面的接触单元设置。

（2）划分平面

设置桩所在平面划分尺寸。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls> ManualSize> Lines>Picked Lines 拾取桩上直线 L1，L3，单击 OK 按钮，NDIV 设为 2。同样的方式拾取 L2，L4，划分 NDIV=2。

命令流如下：

```
LSEL，S，，，1，3，2
LESIZE，ALL，，，2
LSEL，S，，，2，4，2
LESIZE，ALL，，，16
```

设置土体平面划分尺寸。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Size Cntrls> ManualSize> Lines>Picked Lines 拾取直线 L5～L12，设置划分尺寸 Size=1。

```
LSEL，S，，，5，12，1
LESIZE，ALL，1
```

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>3 or 4 sided，拾取各平面，单击 OK 按钮完成网格划分。

划分面网格的命令如下：

```
AMESH，1
```

生成初步模型如图 16-20 所示。

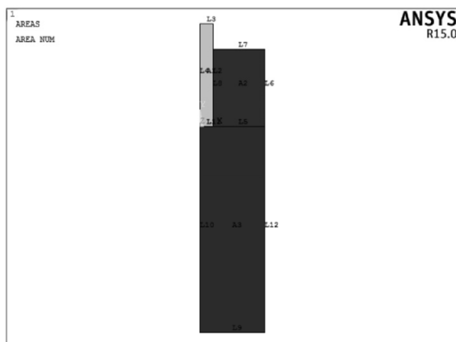


图 16-19　几何面模型

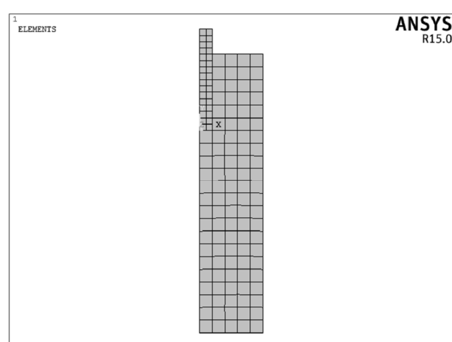


图 16-20　有限元面模型

（3）拉伸成体

先将桩平面拉伸成体。执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude> Elem Ext Opts，设置拉伸后目标单元为 2 SOLID65，材料编号选为 1，单元尺寸设为 2，并勾选 ACLEAR 项，设置如图 16-21 所示。

单击 OK 按钮完成设置。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude> Areas>By XYZ Offset，选择桩平面，单击 OK 按钮，弹出对话框，在 DX，DY，DZ 中输入 0，0，-1，单击 OK 按钮完成拉伸。

拉伸土体平面 a2，a3。同样的路径，设置目标单元为 2 SOLID65，材料编号选为 2，单元尺寸设为 2，并勾选 ACLEAR 选项，单击 OK 按钮完成拉伸。

相应的命令流如下：

```
EXTOPT，ESIZE，2，0，                    !拉伸成体 1
EXTOPT，ACLEAR，1
TYPE，2
MAT，1
VEXT，1，，，，，，-1
EXTOPT，ESIZE，2，0，                    !拉伸成体 2，3
EXTOPT，ACLEAR，1
MAT，2
VEXT，2，3，1，，，-1
ALLSEL
/VIEW，1，1，1，1
EPLOT
```

拉伸后的模型如图 16-22 所示。

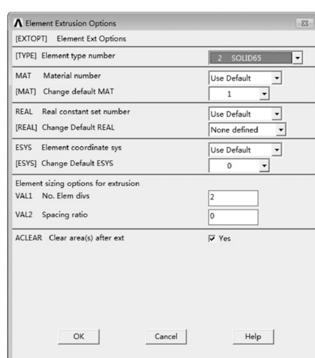


图 16-21 拉伸单元设置

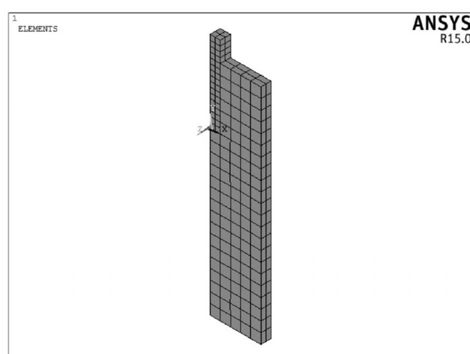


图 16-22 拉伸后的模型

（4）生成桩后土体

桩后土体模型直接生成与之前模型向适应的长方体即可，生成步骤及材料参数同桩侧土体，此处不再赘述。生成两侧面模型如图 16-23 所示。

相应命令流如下。

```
K，1001，5，6，-5                       !建立桩后土体
K，1002，5，0，-5
K，1003，5，-16，-5
L，18，1001
L，1001，1002
L，1002，17
L，1002，1003
L，1003，21                             !面 4 和面 5
AL，22，36，37，38
AL，30，38，39，40
EXTOPT，ESIZE，10，0，
EXTOPT，ACLEAR，1                       !拉伸成体 4 和 5
VEXT，19，20，1，-5
VPLOT
VSEL，S，，，4，5，1
VPLOT
LSEL，S，，，36，52，1
LESIZE，ALL，1
```

```
TYPE，2                              !划分体 4 和 5
MAT，2
VMESH，ALL
ALLSEL
```

拉伸成体并划分尺寸后如图 16-24 所示。

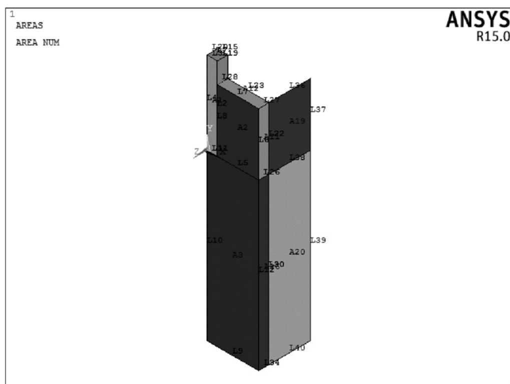


图 16-23　桩后土体侧面

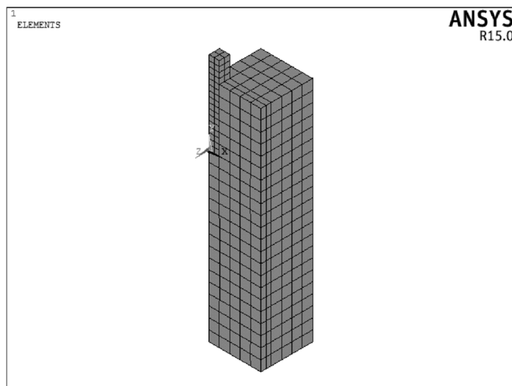


图 16-24　1/4 模型

（5）生成 1/2 模型

通过镜像命令，可以很方便地生成 1/2 模型。执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling> Reflect> Volumes，在拾取对话框中单击 pick all 按钮，拾取所有实体。弹出 Reflect Volumes 对话框，勾选 Y-Z Plane X 选项，即以 YZ 平面为对称面，进行镜像生成。其余选项按默认处理。

镜像生成模型命令流：

```
ALLSEL
VSYMM，X，ALL，，，，0，0
```

（6）对模型进行整理

模型生成后，针对所有土体部分进行重复单元的合并及编号的压缩整理。注意此时不可将桩体带入，否则无法进行接触单元的设置。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Merge Items，选择除桩以外的所有对象，进行重复单元的合并。同样，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Numbering Ctrls>Compress Numbers 对土体部分进行编号压缩。

命令流如下：

```
VSEL，S，，，ALL，，1                  !选择目标体
VSEL，U，，，1，6，5
VPLOT                                 !绘制目标体
ESLV，S                               !选择体上单元
NSLV，S，1                            !选择单元上节点
EPLOT                                 !
NUMMRG，ALL                           !合并重复单元和节点
NUMCMP，ALL                           !压缩编号
ALLSEL                                !
```

最后的模型如图 16-25 所示。

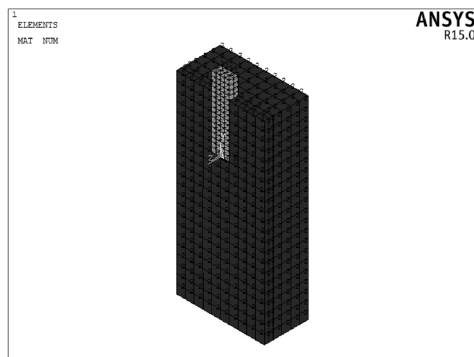


图 16-25 1/2 有限元模型

（7）生成接触单元

土体与桩之间的相互作用可用接触单元来模拟。本例接触面上的刚体目标面为 TARGE170，接触面为 CONTA173 单元，设置方法如下。

定义接触单元。通过路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，添加 3 号单元，依次选取 CONTACT，3D TARGE170，添加 4 号单元为 CONTACT 4nd surf 173。退回 Element Types 对话框，选择 COTA173 单元，单击 Options 按钮进行编辑，设置 K9 为 include，K12 为 No separation。单击 OK 按钮完成设置，并退出单元类型对话框。

相应命令流如下：

```
ALLSEL                              !
ET，3，170                          !设置目标单元
ET，4，173                          !设置接触单元
KEYOPT，4，9，0                     !设置 4 号单元的 K9 项
KEYOPT，4，12，2                    !设置 4 号单元的 K12 项
```

为接触单元定义实常数 r10，路径 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete，其各项值默认即可。定义摩擦系数，通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，选择右侧 Material Models Available> Structural>Friction Cohesion，输入 MU=0.2。

命令流如下：

```
R，10
REAL，10
MP，MU，2，0.2
```

为接触面目标单元定义属性。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create> Elements>Elem Attributes，将单元属性定义为 TYPE3。

生成接触面目标单元。通过路径 Utility Menu>Select>Entities，选择拾取目标为面。选取桩体与地基接触的 6 个面：a4，a5，a6，a31，a32，a33。再将拾取目标选为节点，拾取方式选择 Attached to，areas。这样就将 6 个面上的节点选中了。通过路径 Main Menu> Preprocessor> Modeling>Create>Elements>Surf / Contact>Node to Surf，单击 pick all 按钮通过已选取的节点生成目标单元。如图 16-26 所示。

生成接触面目标单元的命令流如下：

```
VSEL，S，，，1，6，5
```

```
VPLOT
ASEL，S，，，4，6，1
ASEL，A，，，31，33，1
APLOT
CM，TARGET，AREA
TYPE，3
NSLA，S，1
ESURF，ALL
ESEL，S，TYPE，，3
```

生成接触面接触单元。选取与桩接触的土体上的 6 个面 a5，a13，a22，a41，a46，a50，方法同上。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Elements>Elem Attributes，将单元属性定义为 TYPE4。拾取其上所有节点，依附于节点生成单元，方法同上，生成接触单元，如图 16-27 所示。

生成接触面接触单元的命令流如下：

```
VSEL，S，，，ALL
VSEL，U，，，1，6，5
VPLOT
ASEL，S，，，5
ASEL，A，，，13
ASEL，A，，，22
ASEL，A，，，50
ASEL，A，，，41
ASEL，A，，，46
APLOT
CM，CONTACT，AREA
TYPE，4
NSLA，S，1
ESURF，ALL
ESEL，S，TYPE，，4
EPLOT
/PSYMS，ESYS，1
ALLSEL
GPLOT
FINISH
```

建模完成。

图 16-26　目标单元

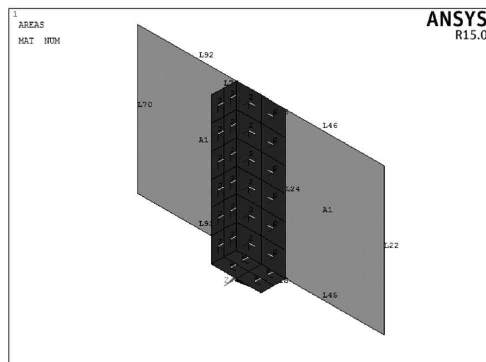


图 16-27　接触单元

16.2.4 加载及求解

（1）施加约束

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas，拾取模型左右两外侧，背面和底面 4 个面，按位置来说，分别是 X=−5，X=5，Z=−5，Y=−16 四个面。单击 OK 按钮完成拾取，添加约束对话框中选择 All DOF 选项。通过路径 Main Menu>Solution> Define Loads>Apply> Structural>Displacement>Symmetry B.C>On Areas，拾取对称面上所有的面，即 Z=0 的面，施加对称约束。

```
/SOLU                               !进入求解模块
ASEL，S，LOC，X，5                  !选择要约束的面
ASEL，A，LOC，X，-5                 !
DA，ALL，ALL                        !施加约束
APLOT                               !
ASEL，S，LOC，Z，0                  !选择对称面
DA，ALL，SYMM                       !施加对称约束
ASEL，S，LOC，Z，-5                 !
DA，ALL，ALL                        !
ASEL，S，LOC，Y，-16                !
DA，ALL，ALL                        !
ALLSEL                              !
```

（2）施加荷载

施加重力荷载。执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global，在 ACELY 栏内输入 9.8，单击 OK 按钮完成。施加上部荷载。通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Pressure>On Areas，选择桩的上表面，施加压力 30E4。

命令流如下：

```
ACEL，0，9.8，0，                   !施加重力加速度
ASEL，S，LOC，Y，8                  !选择桩上表面
SFA，ALL，3，PRES，30E4             !施加上部荷载
```

（3）设置分析项

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，选择分析类型为 Static。再进行相关分析项的设置。通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Basic 打开如图 16-28 所示 Solution Controls 对话框。

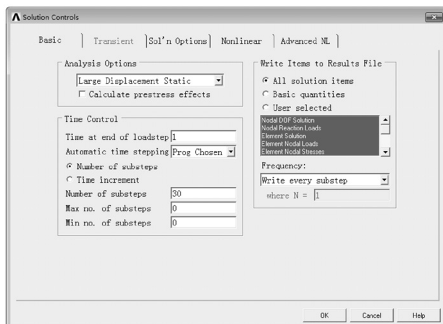


图 16-28 Solution Controls 对话框

在 Analysis Options 下拉框中打开静力大变形；在 Time Control 中输入 Time at end of loadstep 值为 1；在 Number of substep 输入值 30。对话框右侧的 Write Items to Results File 栏中，选择输出项为 All Solution items，输出频率 Frequency 选择 Write every substep。设置界面具体见图 16–28。完成设置后单击 OK 按钮退出对话框。

设置命令流如下：

```
ANTYPE，STATIC                          !设定分析类型
NLGEOM，ON                              !打开大变形分析
TIME，1
NSUB，30
OUTRES，ALL，ALL
```

（4）求解

通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 开始求解。

命令流：

```
ALLSEL
SOLV                                    !求解
FINISH
```

16.2.5 后处理

（1）位移分布图

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，选择 DOF Y-component of displacement，得到如图 16–29 所示的 Y 向位移云图。选择 Displacement vector sum 得到如图 16–30 所示位移总云图。

相应的命令流如下：

```
/POST1                                  !进入一般后处理
PLNSOL，U，Y，0，1.0                    !绘制 Y 向位移云图
PLNSOL，U，SUM，0，1.0                  !总位移云图
```

由图可见，沉降值 0.354E–4，值很小，在 2m 宽的桩的正下方，其沉降分布反而相对桩边缘较小。沉降云图呈现出桩侧两斜椭圆。

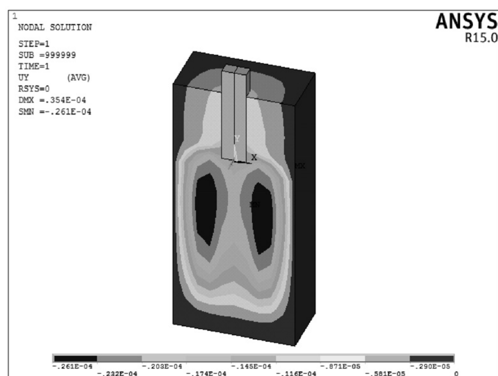


图 16–29　Y 向位移云图

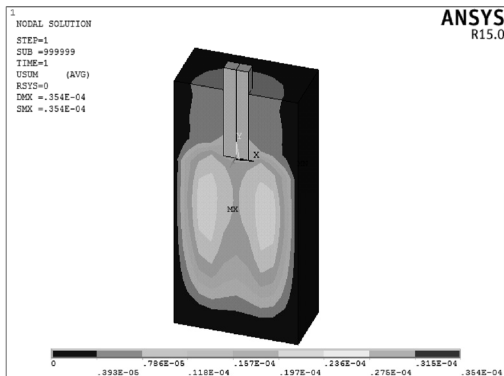


图 16–30　位移总云图

（2）应力分布

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，选择 Stress 选项，可得到各方向应力情况云图。第一主应力如图 16-31 所示，第三主应力如图 16-32 所示。

相应的命令流如下：

```
PLNSOL，S，1，0，1.0
PLNSOL，S，1，0，3.0
```

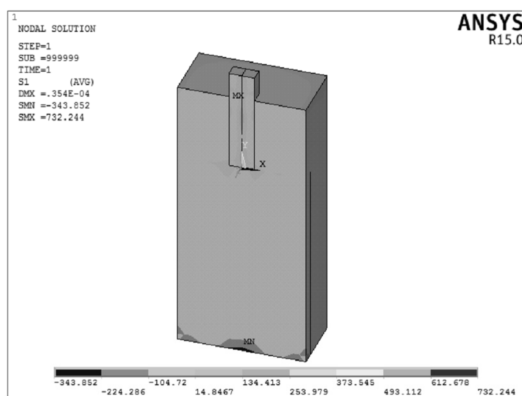


图 16-31 第一主应力云图

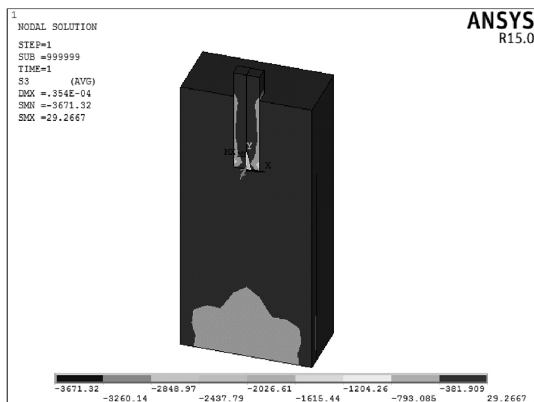


图 16-32 第三主应力云图

（3）应力分布曲线

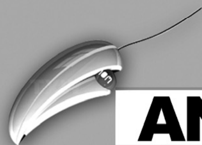
通过 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>By Location，定义路径 p1。再通过路径 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>Modify Path 输入路径上第一个点（0，0，0），定义路径终点（0，-16，0），即所求路径沿桩延伸向地基深处。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Path Operations>Define Path>Path Status>Current Path，定义 X 方向和 Y 方向的应力为要进行绘制的沿路径分布的项。

定义路径及目标项的命令如下：

```
ESEL，S，TYPE，1                        !按照单元号选择实体
PATH，P1，2                             !定义路径
PPATH，1，，0，0，0                      !路径起点
PPATH，2，，0，-16，0                    !路径终点
PDEF，SY，S，Y                          !Y 方向应力
PDEF，SX，S，X                          !X 方向应力
PDEF，S1，S，1                          !第一主应力
PDEF，UY，U，Y                          !Y 方向位移
```

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Plot Path Item>On Graph 绘制定义好的路径及要显示的项，分别得到沿地基深度方向分布的 X 方向应力，如图 16-33 所示；Y 方向应力如图 16-34 所示。



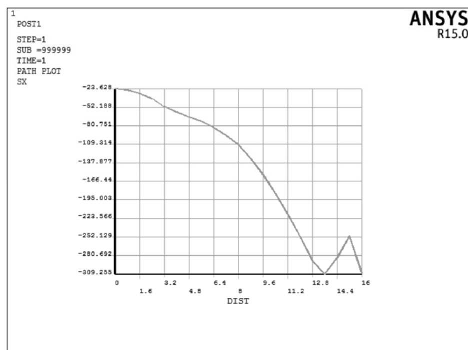


图 16-33　X 方向应力分量沿深度分布曲线

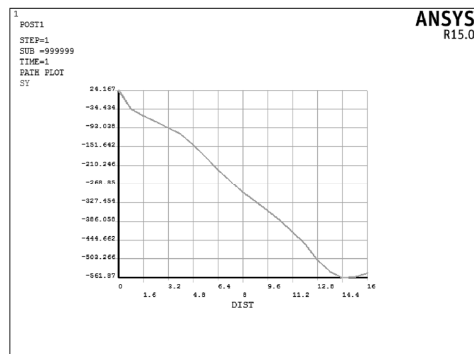


图 16-34　Y 方向应力分量沿深度分布曲线

得到第一主应力沿深度方向分布曲线，如图 16-35 所示；得到沿深度方向的沉降分布曲线，如图 16-36 所示。

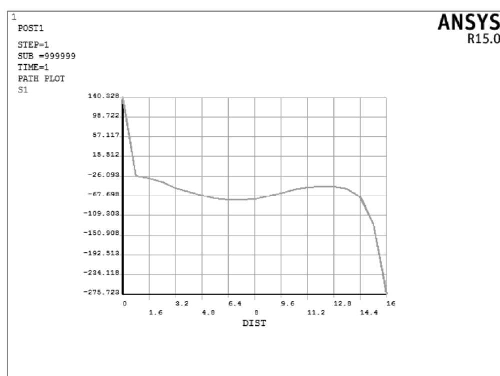


图 16-35　第一主应力沿深度方向分布曲线

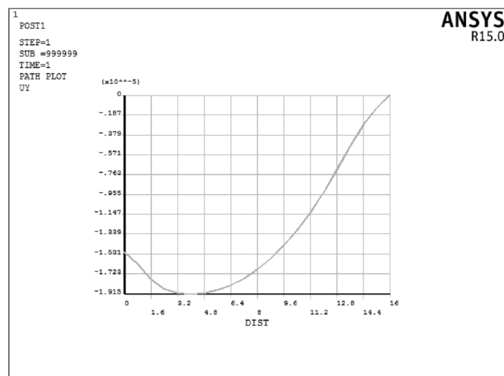


图 16-36　沉降分布曲线

以上绘制曲线的命令流如下：

```
PLPATH，SX                                !绘制各路径图
PLPATH，SY
PLPATH，S1
PLPATH，UY
```

16.3　本章小结

本章学习了基础工程中常见问题的建模及分析方法。首先对房屋刚性独立基础进行了建模及静力分析。在建模中主要使用了旋转生成体的方法，用户要注意学习使用。然后对考虑接触的桩基进行了分析，用户应学会接触单元的使用方法以及摩擦力的设定方法。



第 17 章　桥梁工程实例分析

桥梁工程是土木工程中与交通直接相关的重要工程形式。随着经济的发展，快捷便利的交通已经越来越受到重视，而不论是跨河跨海大桥，还是城市轨道交通桥、高架桥等，都可以通过跨越的方式真正地将天堑变为通途。本章将针对桥梁工程中的典型实例进行仿真分析。

本章学习目标

- 掌握钢桁架桥的建模及静力分析方法。
- 掌握大跨度悬索桥的建模方法。
- 学习悬索桥的地震动力分析方法。

17.1　钢桁架桥

桁架桥（Truss Bridge）指的是以桁架作为上部结构主要承重构件的桥梁。

桁架桥一般由主桥架、上下水平纵向连接系、桥门架和中间横撑架以及桥面系组成。在桁架中，弦杆是组成桁架外围的杆件，包括上弦杆和下弦杆，连接上、下弦杆的杆件叫腹杆，按腹杆方向之不同又区分为斜杆和竖杆。弦杆与腹杆所在的平面就叫主桁平面。

大跨度桥架的桥高沿跨径方向变化，形成曲弦桁架；中、小跨度采用不变的桁高，即所谓平弦桁架或直弦桁架。

17.1.1　问题简述

（1）几何尺寸

如图 17-1 所示为一桁架结构桥梁，全长 32m，每一节水平段长 4m，桁架高 5.5m。

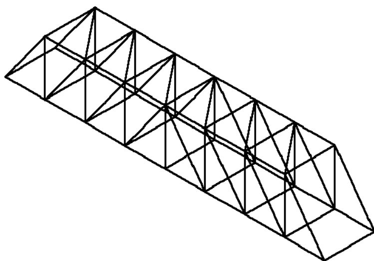


图 17-1　桁架桥上部结构

（2）单元及材料特性

桁架：采用 BEAM188 单元，共 3 种不同尺寸的工字型截面。

材料属性：钢材，弹性模量 EX=2.1E11；泊松比 0.30，密度 7800。

桥面板：采用 SHELL181 单元，厚度 0.3m。

材料属性：混凝土板，弹性模量 EX= 3.5E10；泊松比 0.18，密度 2500。

17.1.2 前处理

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 Truss bridge。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

2）定义单元类型。通过路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，单击 Add 按钮添加单元 BEAM188 为 1 号单元。

添加单元 SHELL181 为 2 号单元。回到 Element Types 对话框，定义单元特性。选择 BEAM188，单击 Options 按钮，将 K3 项设为 quadradic form。

对单元的定义及功能设定可以通过以下命令完成。

```
/PREP7                                  !进入前处理
ET，1，BEAM188                          !定义单元类型
KEYOPT，1，3，2
ET，2，SHELL181
KEYOPT，1，3，2
```

3）定义材料属性。本例需要定义 2 种材料，桁架为型钢钢材，桥面路面板为混凝土。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，弹性模量 EX=2.1E11；泊松比 PRXY=0.30。

单击 OK 按钮完成设置。在 Material Models Available> Structural>Density 中设定材料密度 7800。单击 OK 按钮完成设置。

相同的路径，建立材料 2，其各项参数为弹性模量 EX= 3.5E10；泊松比 0.18，密度 2500。

```
MP，EX，1，2.1E11                       !定义材料弹性模量
MP，PRXY，1，0.30                       !定义材料泊松比
MP，DENS，1，7800                       !定义材料密度
MP，EX，2，3.5E10                       !定义材料弹性模量
MP，PRXY，2，0.18                       !定义材料泊松比
MP，DENS，2，2500                       !定义材料密度
```

4）定义截面。为各桁架杆件定义截面。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections> Beam>Common Section，建立截面 ID=1，设定截面形状为 I 型，在接下来的一系列输入框内，依次输入尺寸参数：0.4，0.4，0.4，0.02，0.02，0.02。

定义 ID=2，I 型截面。依次输入：0.4，0.4，0.4，0.016，0.016，0.016；定义 ID=3，依次输入：0.3，0.3，0.3，0.016，0.016，0.016。

定义路面板截面：Main Menu>Preprocessor>Sections>Shell>Lay-up>Add/Edit，定义 ID=4，Thickness=0.3，material ID=2。

命令流如下：

```
SECTYPE，   1，BEAM，I，，0                       !定义 BEAM 截面特性
SECOFFSET，CENT
SECDATA，0.4，0.4，0.4，0.02，0.02，0.02，
SECTYPE，   2，BEAM，I，，0
SECOFFSET，CENT
```

```
SECDATA，0.4，0.4，0.4，0.016，0.016，0.016，0，
SECTYPE，  3，BEAM，I，，0
SECOFFSET，CENT
SECDATA，0.3，0.3，0.3，0.016，0.016，0.016，0
SECT，4，SHELL                                    !定义 SHELL 截面
SECDATA，0.3，2，，1
```



5）建立模型。本例通过命令流建模。

先建立单面桁架：

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 生成关键点。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Keypoints>In Active CS 生成直线。

命令流如下：

```
!-定义几何关键点
K，1，0，0，，
K，2，4，0，，
K，3，8，0，，
K，4，12，0，，
K，5，16，0，，
K，6，20，0，，
K，7，24，0，，
K，8，28，0，，
K，9，32，0，，
K，10，4，5.5，，
K，11，8，5.5，，
K，12，12，5.5，，
K，13，16，5.5，，
K，14，20，5.5，，
K，15，24，5.5，，
K，16，28，5.5，，
!通过几何点生成桥底梁的线
L，1，2
L，2，3
L，3，4
L，4，5
L，5，6
L，6，7
L，7，8
L，8，9
!生成桥顶梁和侧梁的线
L，9，16
L，15，16
L，14，15
L，13，14
L，12，13
L，11，12
L，10，11
L，1，10
!生成桥身弦杆的线
L，2，10
L，3，10
```

```
L，3，11
L，4，11
L，4，12
L，4，13
L，5，13
L，6，13
L，6，14
L，6，15
L，7，15
L，7，16
L，8，16
```

生成几何模型如图 17-2 所示。

通过选取直线，完成网格属性及尺寸控制。

命令流：

```
LSEL，S，，，9，16，1，                !拾取直线
LATT，1，，1，，，，2                 !赋属性，截面为 2 号
LSEL，S，，，17，29，1，
LATT，1，，1，，，，3                 !截面为 3 号
LSEL，S，，，1，8，1，
LATT，1，，1，，，，1                 !截面为 1 号
AllSEL，all
LESIZE，all，，，1，，，，，1          !控制网格份数
LMESH，all                            !划分网格
```

划分网格后如图 17-3 所示。

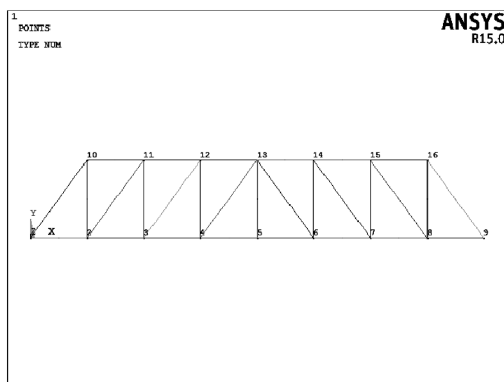


图 17-2　生成单排几何模型

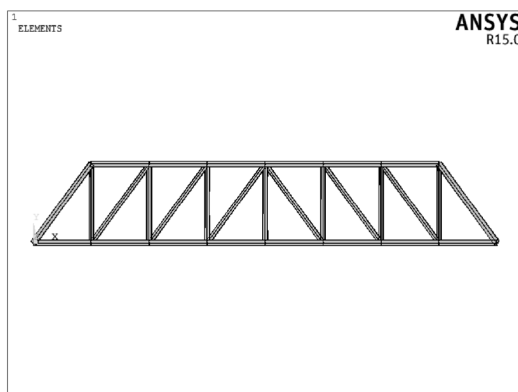


图 17-3　显示单元尺寸

通过复制，生成另一侧的桁架。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Copy>Lines，拾取所有直线，ITIME=2，NOELEM 勾选 Lines and mesh 选项，在 DZ 输入 5。

生成后如图 17-4 所示。此时复制生成的模型包括关键点、直线、节点、单元，均按照原型的单元材料属性与网格特性进行了复制与生成。

再连接两排桁架的对应点，形成桁架整体，命令流如下。

```
LGEN，2，ALL，，，，，5，，             !复制命令
```

```
SECNUM，2                                    !定义当前截面类型为2型
*DO，I，1，16                                 !循环生成横向杆件
E，I，I+16
*ENDDO
*DO，I，11，16                                !循环生成顶部斜支撑
E，I，I+15
*ENDDO
E，11，26
```

复制生成单元如图 17-4 所示。生成整体桁架模型如图 17-5 所示。

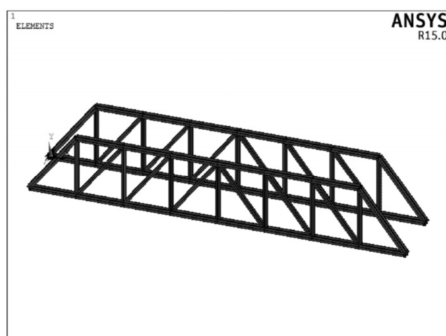


图 17-4　复制生成单元

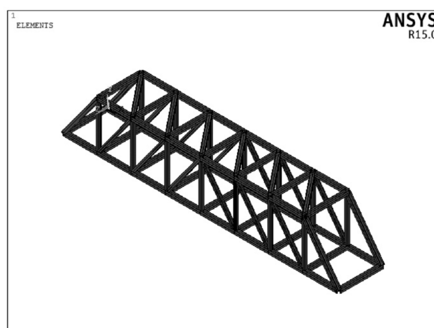


图 17-5　完整的桁架模型

通过 4 节点，直接生成路面板单元。

命令流如下：

```
TYPE，2                                       !为路面板指定单元及材料
MAT，2
SECNUM，4
E，1，17，18，2                               !生成板
E，2，18，19，3
E，3，19，20，4
E，4，20，21，5
E，5，21，22，6
E，6，22，23，7
E，7，23，24，8
E，8，24，25，9
```

建模结束，如图 17-6 所示。

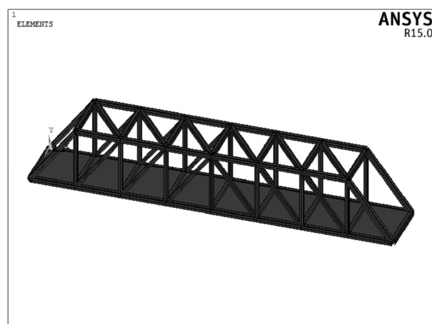


图 17-6　桥体有限元模型

17.1.3 加载及求解

（1）施加约束

对模型左端 X=0 处施加全约束；对右端 X=32 处施加 UY 方向约束。

执行路径 Utility Menu>Select>Entities>Nodes，By Location 拾取节点。

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes 施加约束。

（2）施加重力荷载

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global，弹出的对话框中输入 ACELY=10。

（3）施加外荷载

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Force/Moment>On Nodes。

选取跨中两节点，N5，N21，施加沿 Y 方向向下的集中荷载 FY=−10000。

选取跨中与 N5，N21 相邻的 4 个节点 N4，N6，N20，N22，施加 FY=−5000。

施加完约束和荷载的模型如图 17-7 所示。

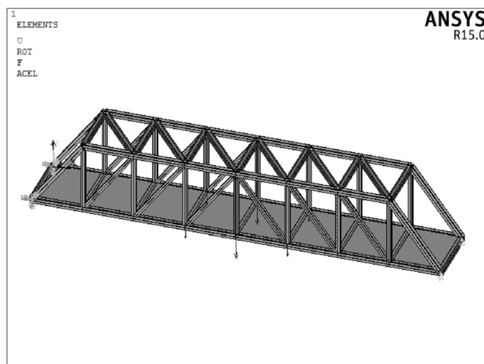


图 17-7　施加完约束和荷载的模型

（4）求解

执行路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

命令流如下：

```
/SOLU                                      !进入求解模块
NSEL，S，LOC，X，0                          !选择左端节点
D，ALL，，，，，，ALL，，，，，               !约束所有自由度
ALLSEL，ALL
NSEL，S，LOC，X，32                         !选择右端节点
D，ALL，，，，，，，UY，，，，                !约束 UY
ALLSEL，ALL
ACEL，0，10，0                              !重力荷载
F，4，FY，-5000                             !外荷载
F，6，FY，-5000
F，5，FY，-10000
F，20，FY，-5000
F，22，FY，-5000
```

```
F, 21, FY, -10000                    !重画图形
/REPLOT
ALLSEL, ALL                          !求解
SOLVE
```

17.1.4 一般后处理

求解结束，进入一般后处理进行结果查看与处理。

（1）查看变形趋势

执行路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape。

得到结构静载下的变形如图 17-8 所示。

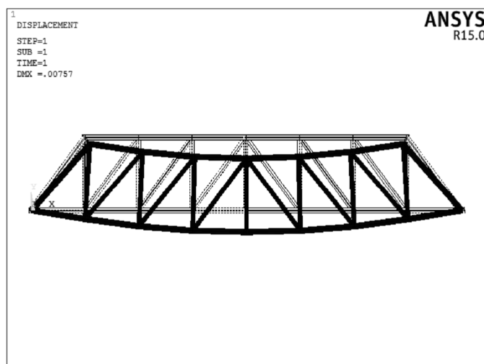


图 17-8 结构变形

由图可见，桥桁架最大挠度 0.0072m，符合使用要求。

（2）查看结构云图

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，查看节点求解的位移云图。

结构 Y 方向位移云图如图 17-9 所示，Z 方向位移云图如图 17-10 所示。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Element Solu，查看单元求解的内力图。

结构内力云图：FX 分布如图 17-11 所示，FY 云图如图 17-12 所示。

（3）结构的内力及变形等值线图

通过路径 Utility Menu>PlotCtrls>Device Options，可以查看结构内力及变形的等值线分布图。

（4）显示轴力

通过定义单元表，可以绘制结构轴力图。

执行路径 Main Menu>General Postproc>Element Table>Define Table，定义单元表。

执行路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Line Elem Res，绘制定义项。

结构 Y 方向位移等值线如图 17-13 所示，X 方向位移等值线如图 17-14 所示。

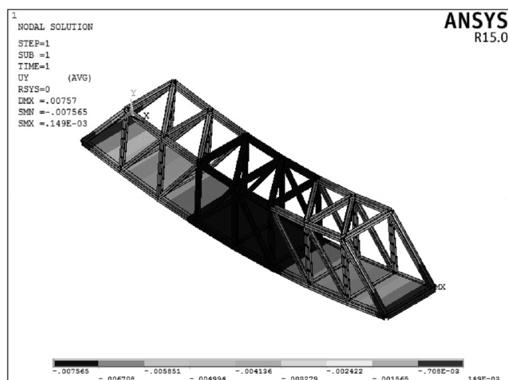


图 17-9　UY 云图

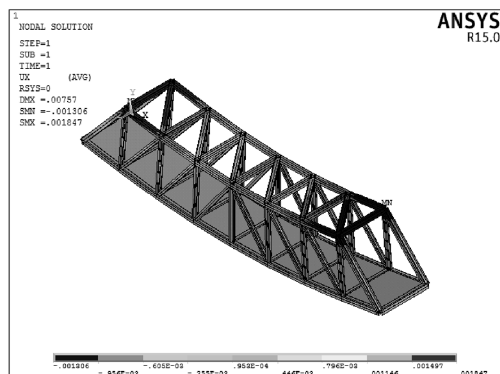


图 17-10　UZ 云图

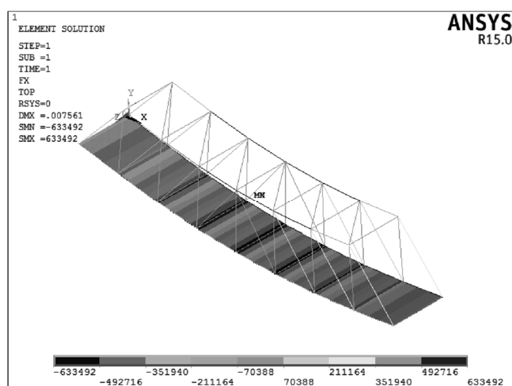


图 17-11　单元 FX 分布

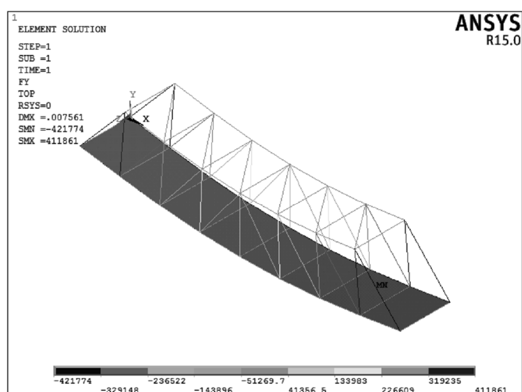


图 17-12　单元 FY 分布

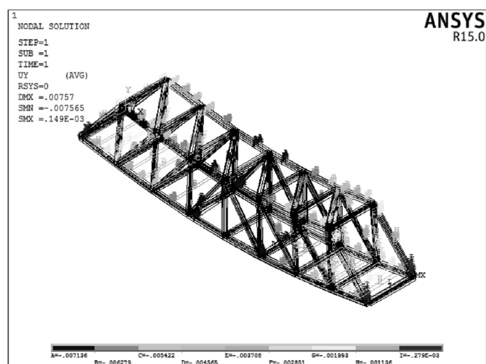


图 17-13　UY 等值线

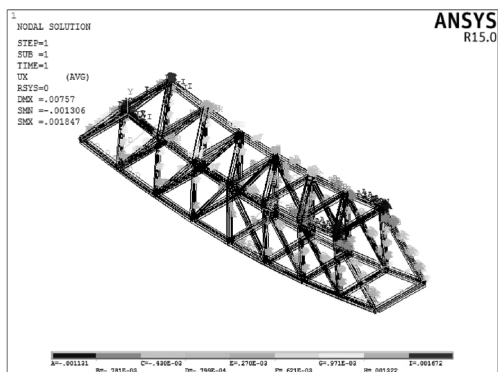


图 17-14　UX 等值线

结构应力等值线如图 17-15 所示，结构轴力图如图 17-16 所示。

后处理命令流：

```
/POST1                                  !后处理
PLDISP，1
PLNSOL，U，Y，0，1.0                    !显示 Y 方向位移
PLNSOL，U，X，0，1.0                    !显示 X 方向位移
PLESOL，F，X，0，1.0
```

```
PLESOL，F，Y，0，1.0
/DEVICE，VECTOR，1
PLNSOL，U，Y，0，1.0                    !显示 Y 方向位移
PLNSOL，U，X，0，1.0                    !显示 X 方向位移
PLESOL，S，X，0，1.0
!------显示线单元轴力------
ETABLE，BAR_I，SMISC，1                 !定义单元表
ETABLE，BAR_J，SMISC，1
PLLS，BAR_I，BAR_J，0.5，1              !画出轴力图
FINISH
```

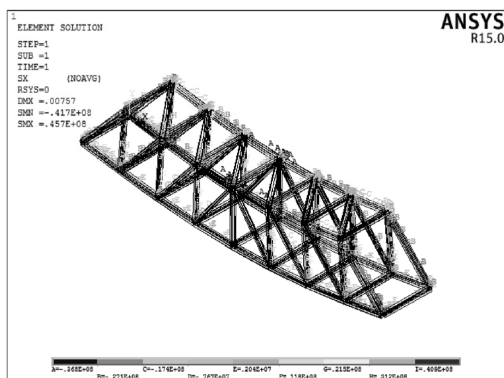


图 17-15　SX 等值线

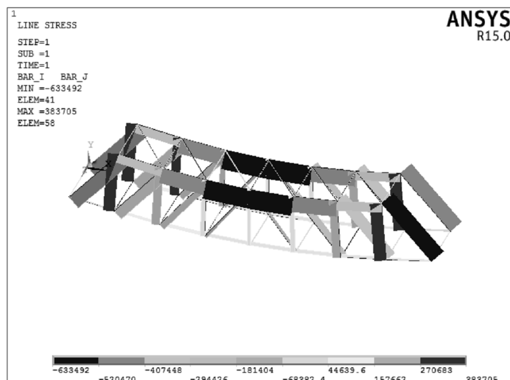


图 17-16　结构轴力图

17.2　大跨度悬索桥

悬索桥，又名吊桥（Suspension Bridge），指的是以通过索塔悬挂并锚固于两岸（或桥两端）的缆索（或钢链）作为上部结构主要承重构件的桥梁。

悬索桥缆索几何形状由力的平衡条件决定，一般接近抛物线。从缆索垂下许多吊杆，把桥面吊住，在桥面和吊杆之间常设置加劲梁，同缆索形成组合体系，以减小荷载所引起的挠度变形。

17.2.1　悬索桥背景简介

（1）悬索桥受力及特点

悬索桥是以承受拉力的缆索或链索作为主要承重构件的桥梁，由悬索、索塔、锚碇、吊杆、桥面系等部分组成。

悬索桥的主要承重构件是悬索，它主要承受拉力，一般用抗拉强度高的钢材（钢丝、钢缆等）制作。

由于悬索桥可以充分利用材料的强度，并具有用料省、自重轻的特点，因此悬索桥在各种体系桥梁中的跨越能力最大，跨径可以达到 1000m 以上。

（2）分类

按照桥面系的刚度大小，悬索桥可分为柔性悬索桥和刚性悬索桥。

柔性悬索桥的桥面系一般不设加劲梁，因而刚度较小，在车辆荷载作用下，桥面将随悬

索形状的改变而产生 S 形的变形，对行车不利，但它的构造简单，一般用作临时性桥梁。

刚性悬索桥的桥面用加劲梁加强，刚度较大。加劲梁能同桥梁整体结构承受竖向荷载。

除以上形式外，为增强悬索桥刚度，还可采用双链式悬索桥和斜吊杆式悬索桥等形式，但构造较复杂。

和拱肋相反，悬索的截面只承受拉力。简陋的只供人、畜行走用的悬索桥常把桥面直接铺在悬索上。通行现代交通工具的悬索桥则不行，为了保持桥面具有一定的平直度，是将桥面用吊索挂在悬索上。

与拱桥用刚性的拱肋作为承重结构不同，其采用的是柔性的悬索作为承重结构。为了避免在车辆驶过时，桥面随着悬索一起变形，现代悬索桥一般均设有刚性梁（又称加劲梁）。桥面铺在刚性梁上，刚性梁吊在悬索上。

现代悬索桥的悬索一般均支承在两个塔柱上。塔顶设有支承悬索的鞍形支座。承受很大拉力的悬索的端部通过锚碇固定在地基中，也有个别固定在刚性梁的端部，这种称为自锚式悬索桥。

（3）结构特点

悬索桥中最大的力是悬索中的张力和塔架中的压力。由于塔架基本上不受侧向的力，它的结构可以做得相当纤细，此外悬索对塔架还有一定的稳定作用。

假如在计算时忽视悬索的重量的话，那么悬索将形成一个双曲线。这样计算悬索桥的过程就变得非常简单了。

17.2.2 问题简述

本例模拟建立一双索塔悬索桥。

（1）几何参数

桥全长 400m，双索塔，自桥面算起塔高 20m。全桥模型成对称分布。两塔之间跨度 200m，左右塔距岸边各 100m。悬索间距 10m。几何形状如图 17-17 所示。



图 17-17　悬索桥几何形状

（2）单元及材料

索塔及桥面各梁采用 BEAM188 单元，拉索及主揽采用 LINK180 单元。

材料属性：钢索弹性模量 25E10，泊松比 0.1，密度 1000。

钢梁弹性模量 30E10，泊松比 0.1，密度 1000。

17.2.3 单元及材料参数

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 Suspension Bridge。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 选择 Sructural。

2）定义单元类型。通过路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/Delete，单

击 Add 按钮添加单元 LINK180 为 1 号单元。添加单元 BEAM188 为 2 号单元。

3）定义材料属性。本例需要定义 2 种材料，所有的索揽为一种，主塔和桥面梁为一种。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框，定义材料 1。选择对话框右半栏 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，弹性模量 EX=2.5E11，泊松比 PRXY=0.10。单击 OK 按钮完成设置。在 Material Models Available> Structural> Density 中设定材料密度 1000。单击 OK 按钮完成设置。相同的路径，建立材料 2，其各项参数为弹性模量 EX= 3.0E11，泊松比 0.18，密度 1000。

4）实常数。为 LINK180 定义两种实常数。R1 为主揽的截面尺寸，其截面积为 1；R2 为拉索的截面，设为 0.02。路径为 Main Menu>Preprocessor>Real Constants>Add/Edit/Delete

5）定义截面。为 BEAM 单元定义截面。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Sections> Beam>Common Section，建立截面 ID=1，设定截面形状为矩形，在接下来的一系列输入框内，依次输入尺寸参数：0.5，1，此为定义 ID=2，矩形截面。依次输入：3，2。

命令流如下：

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7                                              !进入前处理
ET，1，LINK180                                      !定义单元类型
ET，2，BEAM188
R，1，1，                                           !定义 LINK 单元实常数
R，2，0.02，
SECTYPE，  1，BEAM，RECT，，0                        !定义 BEAM 单元截面
SECOFFSET，CENT
SECDATA，0.5，1，0，0，0，0，0，0，0，0，0，0
SECTYPE，  2，BEAM，RECT，，0
SECOFFSET，CENT
SECDATA，3，2，0，0，0，0，0，0，0，0，0，0
!定义材料参数
MP，EX，1，25E10                                    !LINK 单元弹性模量
MP，PRXY，1，0.1                                    !泊松比
MP，DENS，1，1000                                   !密度
MP，EX，2，30E10                                    !BEAM 单元弹性模量
MP，PRXY，2，0.1                                    !泊松比
MP，DENS，2，1000                                   !密度
```

17.2.4 建模

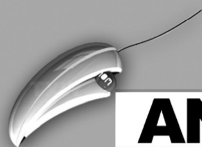
本例建模非常复杂，但各部分之间又有一定的几何规律，因此不适用 GUI 操作，需要使用 APDL 进行。

建模思路：根据模型特点，这里取 X=0，100 区段的模型，然后通过两次镜像生成全部模型。而区段模型建立的难点在于悬索及主揽的确定。这里通过 APDL 编写函数完成其模型。

主揽弧度曲线为双曲线，给出其函数表达式：

$$Y=A*COSH(X/A)-A$$

其中：$COSH(a)=[e^{\wedge a}+e^{\wedge(-a)}]/2$，A=250。



具体操作如下：

（1）生成区段模型

```
A=250
!生成悬索上端节点
*DO，I，1，10                                  !循环语句
    X=10*(I-1)                                 !设定悬索上节点横轴坐标
    Y=A*COSH(X/A)-A                            !通过函数式确定悬索上节点 Y 坐标
    N，I，X，Y                                 !生成悬索上节点。
*ENDDO                                         !结束循环
N，11，100，20                                 !生成索塔上节点
!生成下端节点
*DO，I，1，10                                  !循环生成下节点
    X=10*I
    Y=0
    N，11+I，X，Y
*ENDDO                                         !结束循环
```

悬索上节点如图 17-18 所示，生成下端节点如图 17-19 所示。

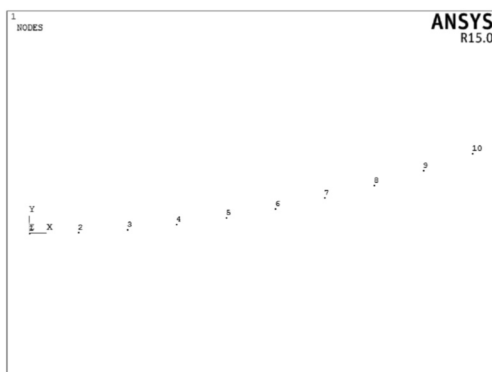


图 17-18　上端节点

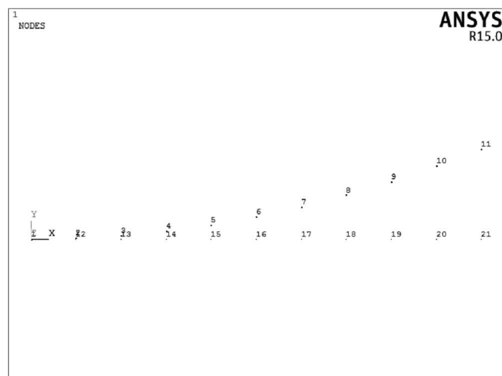


图 17-19　下端节点

设定当前单元类型为 1 号，材料类型 1，截面取实常数 R1，生成主揽模型如图 17-20 和图 17-21 所示。

设定单元类型为 1 号，实常数 2，生成悬索，如图 17-22 所示。设置单元为 2 号，材料 2 号，截面 1，生成桥面主梁，如图 17-23 所示。

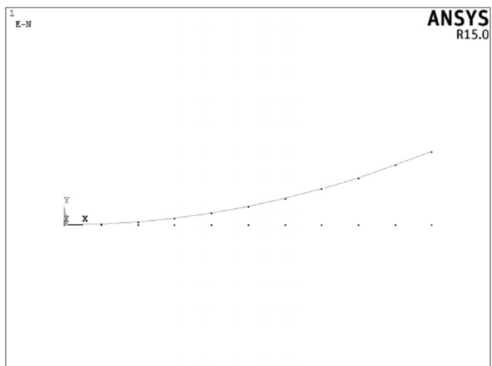


图 17-20　主揽



图 17-21　主揽细部

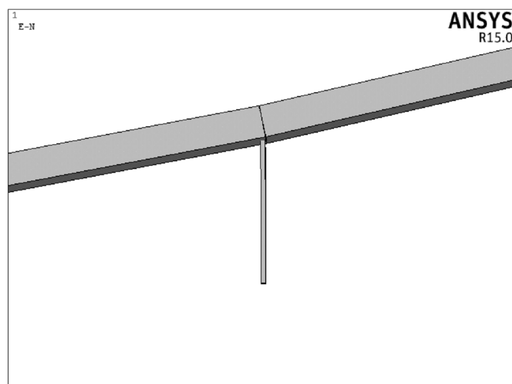


图 17-22 悬索细部



图 17-23 桥面主梁细部

命令如下：

```
TYPE，1                                  !指定单元类型
REAL，1                                  !指定实常数
MAT，1                                   !指定材料
*DO，I，1，10                            !循环生成主揽
 E，I，I+1
*ENDDO
TYPE，1                                  !指定悬索的单元及材料
REAL，2
MAT，1
*DO，I，2，10                            !循环生成悬索
 E，I，I+10
*ENDDO
TYPE，2                                  !指定梁的单元及材料
SECNUM，1                                !指定截面
MAT，2
E，1，12
*DO，I，1，9
 E，I+11，I+12
*ENDDO
```

（2）定义局部坐标

通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Local Coordinate Systems>Create Local CS>At Specified Loc，在当前模型的最右端，即 X=100 处定义局部坐标系。注意新的坐标系代号必须大于 10。

通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Specified Coord Sys，将局部坐标系设为当前坐标系。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Nodes 和 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Reflect>Elements>Auto Numbered。以当前局部坐标系的 YZ 面为对称面，镜像生成另一区段模型。效果如图 17-24 所示。

再通过路径 Utility Menu>WorkPlane>Change Active CS to>Specified Coord Sys 返回到全局笛卡儿坐标（CSYS=0），再将当前所有模型相对 YZ 面为对称面镜像生成另一半模型。效果如图 17-25 所示。

命令流如下：

```
LOCAL，11，0，100                        !定义局部坐标系 11
```

```
CSYS，11                                    !激活坐标系 11
NSYM，X，21，ALL                            !镜像生成节点
ESYM，，21，ALL                             !镜像生成
NUMMRG，ALL                                 !合并重复元素
NUMCMP，ALL                                 !压缩编号
CSYS，0                                     !回到全局坐标
NSYM，X，100，ALL                           !镜像生成另一半模型
ESYM，，100，ALL
NUMMRG，ALL
NUMCMP，ALL
```

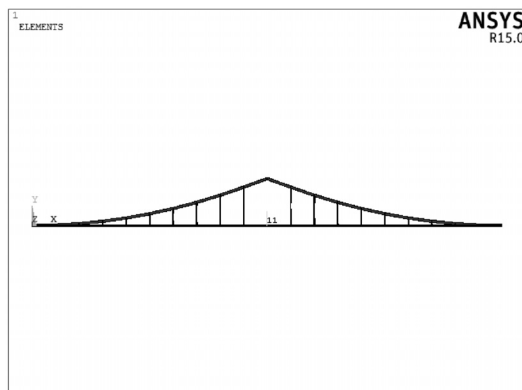


图 17-24　1/2 模型

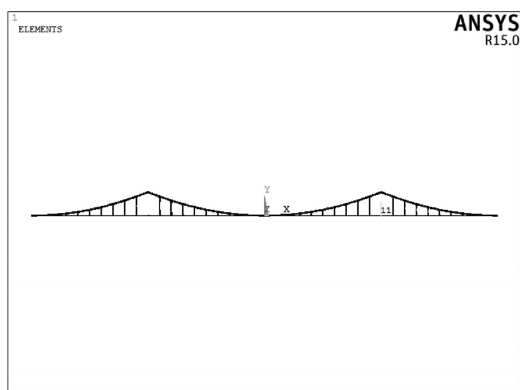


图 17-25　整体模型

再设定当前材料及单元为索塔属性，生成索塔。

命令流如下：

```
TYPE，2                                          !定义单元为 2 号，BEAM 单元
SECNUM，2                                        !截面为 2 号
E，50，60                                        !生成左塔
E，11，21                                        !生成右塔
!对以 LINK180 为单元类型的单元设定初应变
ESEL，S，TYPE，，1                               !按单元类型选择单元
INISTATE，SET，DTYP，EPEL                        !定义初始条件为应变
INISTATE，DEFINE，ALL，，，，1E-5，1E-5          !为初应变赋值
CSDELE，11，，1，                                !删除局部坐标系
```

得到索塔如图 17-26 所示，完成建模如图 17-27 所示。

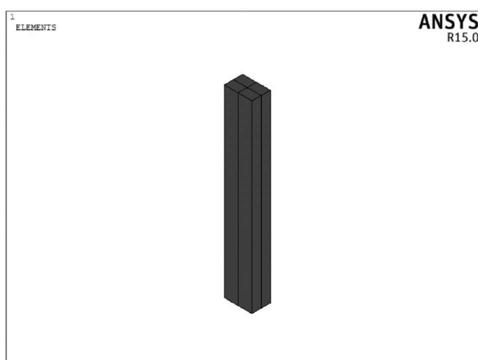


图 17-26　索塔

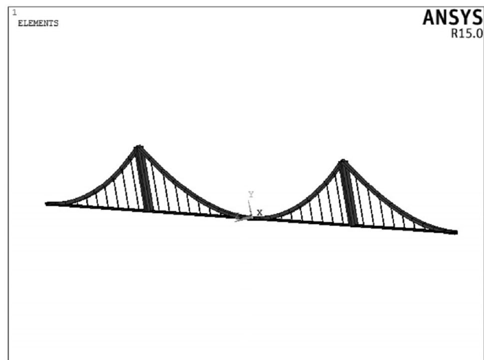


图 17-27　全桥建模完成

17.2.5 找形分析

（1）设定边界条件

本例中，约束两索塔以及模型左右两端点的 UX，UY 自由度，并约束模型正中对称点的 UX 自由度。然后约束模型的 UZ 自由度。

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes。

（2）施加重力荷载

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global，设置 ACELY=10。

（3）“杀死”单元

杀死除主揽以外的其他单元，以便为其找形。

首先要将求解方式 N-R 设为 Full N-R，然后执行路径。Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options。

选择单元：Utility Menu>Select>Entities，Elements，选择 By attributes，Real Num=1，此时选中了主揽单元。再选择 Elements，invert，即可。

杀死单元：执行路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Other>Birth & Death>Kill Elements。

得到模型约束图，如图 17-28 所示。杀死单元后剩余单元如图 17-29 所示。

（4）设置求解项

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Basic，进入设置求解选项对话框。在 Basic 选项卡中，设置 Analysis Options 为 Large Displacement Static。在 Time Control 选项卡中，设置 Time At End Of Loadstep 为 1，在 Number Of Substeps 中依次输入：10，20，5。输出设置为 All Solution Items，频率为 Write Every Substep。

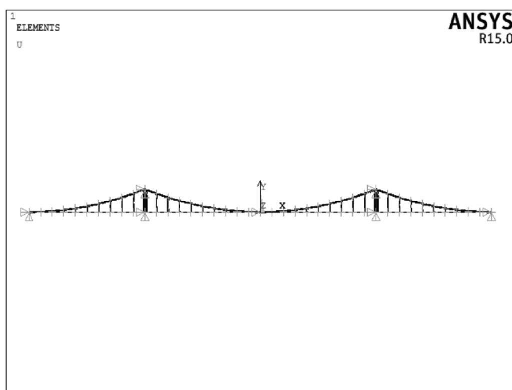


图 17-28　模型约束图

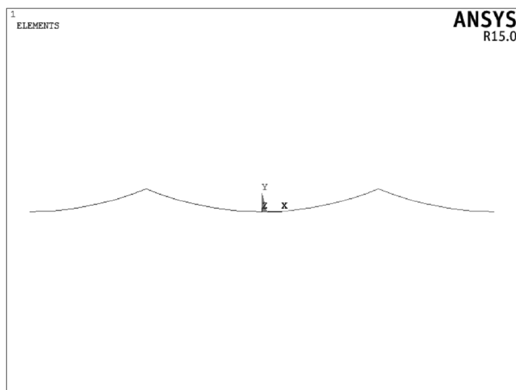


图 17-29　存活单元

（5）开始第一次求解

执行路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

（6）以向量方式查看结果

选择存活单元，通过 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Vector Plot>User-defined，

定义为位移 U，并展示主揽的变形。

本部分命令流：

```
/SOLU                                    !进入求解模块
NSEL，S，，，1，21，10                   !选择节点
NSEL，A，，，22，61，39
NSEL，A，，，50，60，10
D，ALL，UX                               !约束 UX 自由度
NSEL，U，，，1                           !从当前对象中去除节点 1
D，ALL，UY                               !约束 Y 方向自由度
ALLSEL
D，ALL，UZ
ALLSEL
ACEL，，10，，                           !施加重力荷载
NROPT，FULL                              !N-R 分析法设定
ESEL，，REAL，，1                        !选择主揽
ESEL，INVERT                             !反选
EKILL，ALL                               !杀死单元
ALLSEL
NLGEOM，ON                               !打开大变形分析
TIME，1                                  !加载时间 1s
NSUBST，10，20，5                        !荷载步设置
OUTRES，ERASE                            !
OUTRES，ALL，ALL                         !
SSTIF，ON                                !
SOLVE                                    !求解
FINISH                                   !退出求解模块
/POST1                                   !进入一般后处理
ESEL，，LIVE                             !选择存活单元
PLVECT，U                                !显示变形向量
```

得到结果如图 17-30 所示。

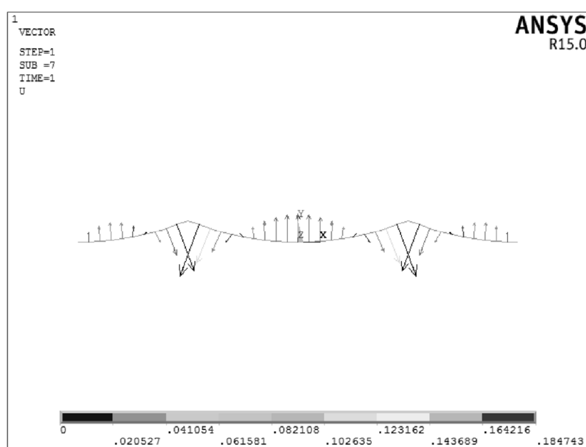


图 17-30　主揽变形矢量图

（7）找形

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Update Geom 更新几何形状，完成一次找形。

（8）多次求解

更新完模型后进入求解模块，再次求解。

命令流如下：

```
/PREP7                                                        !进入前处理
UPGEOM，1，LAST，LAST，'SUSPENSION BRIDGE'，'RST'              !更新模型
FINI                                                          !退出前处理
/SOLU                                                         !进入求解模块
SOLVE                                                         !重新求解
FINI                                                          !退出求解模块
/POST1                                                        !进入后处理再次查看矢量图
ESEL，，LIVE
PLVECT，U
ALLSEL
FINI                                                          !退出后处理
SAVE                                                          !保存结果
```

第二次求解后，得到矢量图如图 17-31 所示。

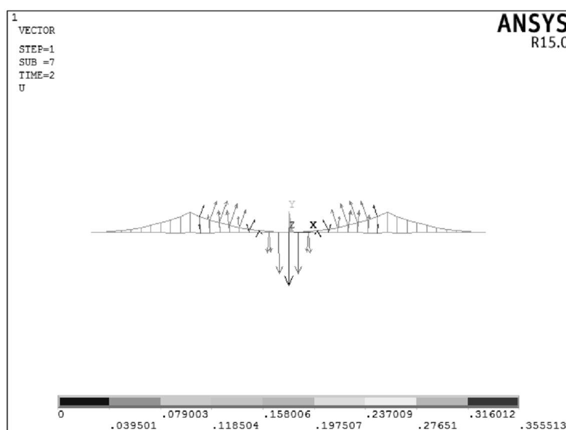


图 17-31 第二次求解后的矢量

17.2.6 施工过程模拟

由中间梁段开始架设，对中点施加梁自重荷载 FY=−50000，相邻部位则为 FY=−25000。通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Basic，设定 Time at end of loadstep 为 2。求解。

命令流如下：

```
/SOLU
F，1，FY，-50000
F，2，FY，-25000
F，41，FY，-25000
TIME，2
SOLVE
/POST1
ESEL，，LIVE
PLVECT，U
ALLSEL
```

得到结果如图 17-32 所示。

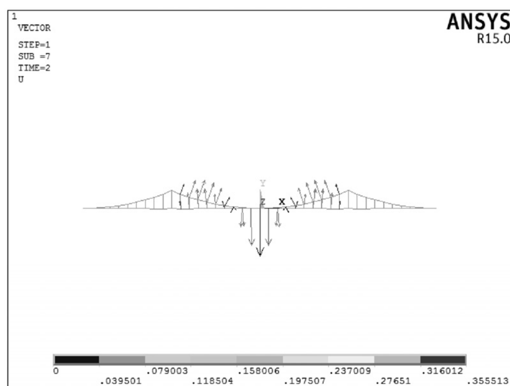


图 17-32　施工中间段加劲梁后

接下来通过循环语句生成其他各段梁。

```
/SOLU                                  !进入求解模块
DOFSEL，S，，FY                        !定义荷载累计
FCUM，ADD，1
DOFSEL，ALL
*DO，I，1，18                          !循环语句
XX0=I*10
XX=(I+1)*10
NSEL，，LOC，X，-XX0
NSEL，R，LOC，Y，0.1，30
NSEL，A，LOC，X，XX0
NSEL，R，LOC，Y，0.1，30
F，ALL，FY，-25000
ALLSEL
NSEL，，LOC，X，XX
NSEL，R，LOC，Y，0.1，30
NSEL，A，LOC，X，-XX
NSEL，R，LOC，Y，0.1，30
F，ALL，FY，-25000
ALLSEL                                 !每一步加载时间 1s
TIME，I+2                              !求解
SOLVE                                  !结束循环
*ENDDO                                 !进入时间历程后处理
/POST26                                !查看跨中挠度变化
NSOL，2，1，U，Y，UY_2
XVAR，1
PLVAR，2，                             !进入后处理查看位移矢量
/POST1
SET，LIST                              !读入 2 步 7 子步数据
SET，2，7                              !绘制变形图
PLDISP，1
ESEL，，LIVE                           !绘制矢量图
PLVECT，U
ALLSEL                                 !存储计算结果
SAVE
```

通过时间历程后处理，得到施工步的跨中挠度时程曲线，如图 17-33 所示。

由图知在时间为 4s 时挠度最大。通过 Main Menu>General Postproc>Results Summary，得到时间步信息如图 17-34 所示，得到第二荷载步第 7 子步为挠度最大步。

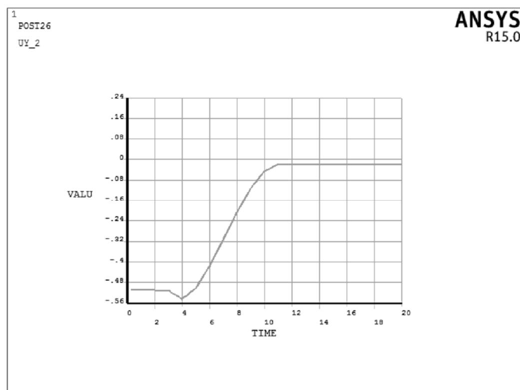


图 17-33 跨中挠度时程曲线

SET,LIST Command

File

5	2.2500	1	5	17
6	2.6250	1	6	18
7	3.0000	1	7	19
8	3.1000	2	1	21
9	3.2000	2	2	22
10	3.3500	2	3	23
11	3.5500	2	4	24
12	3.7500	2	5	25
13	3.8750	2	6	26
14	4.0000	2	7	27
15	4.1000	3	1	29
16	4.2000	3	2	30
17	4.3500	3	3	31
18	4.5500	3	4	32
19	4.7500	3	5	33
20	4.8750	3	6	34
21	5.0000	3	7	35
22	5.1000	4	1	37
23	5.2000	4	2	38
24	5.3500	4	3	39

图 17-34 时间步信息

通过路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Set number，得到第二步 7 子步数据。最后得到其位移矢量如图 17-35 所示。变形如图 17-36 所示。

由计算结果，得到其位移最大值为 0.544352m。

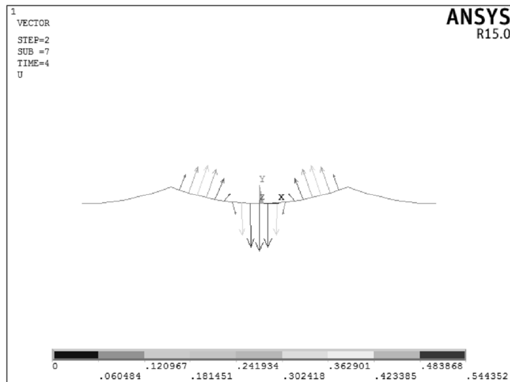


图 17-35 最大位移矢量

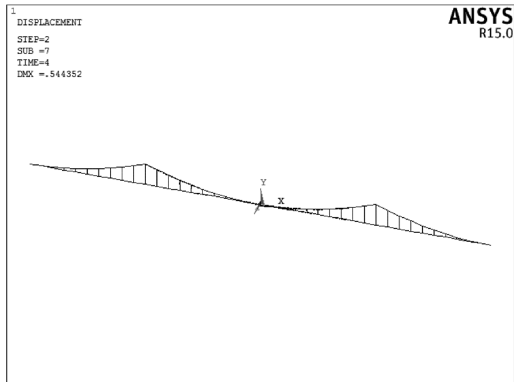


图 17-36 最大位移变形图

17.2.7 悬索桥全结构静力分析

施工完成后，对整座桥进行受力分析。

（1）删除所有集中力

执行路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Delete>Structural>Force/Moment>On Nodes。

命令流如下：

```
/SOLU
NSEL，，LOC，Y，0.1，30
NSEL，A，NODE，，1
FDELE，ALL，FY
ALLSEL
```

（2）激活其余单元

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Loads>Load Step Opts>Other>Birth & Death>Activate Elem 和 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Other>Birth & Death>Activate Elem。

命令流如下：

```
ALLSEL
ESEL，U，LIVE
EALIVE，ALL                             !激活单元
ALLSEL
```

（3）设置并求解

执行路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Basic，设定 Time at end of load step 为 12。

再通过路径 Main Menu>Solution>Solve>Current LS 进行求解。

命令流如下：

```
TIME，12
SOLVE
```

（4）结果分析

后处理命令流如下：

```
/POST1                                  !后处理
ESEL，，LIVE
PLVECT，U                               !绘制位移矢量
ALLSEL
PLDISP，1                               !变形图
PLNSOL，U，Y，0，1.0                    !变形云图
ETABLE，BAR_I，SMISC，1
ETABLE，BAR_J，SMISC，1
PLLS，BAR_I，BAR_J，0.5，1              !画出轴力图
FINISH
SAVE                                    !保存
```

得到变形矢量如图 17-37 所示，最终位移如图 17-38 所示。

得到计算结果最大位移 0.002878，发生在跨中。

变形云图如图 17-39 所示，主揽轴力图如图 17-40 所示。

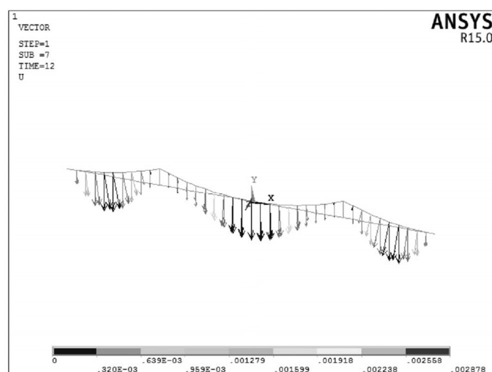


图 17-37　最终变形矢量

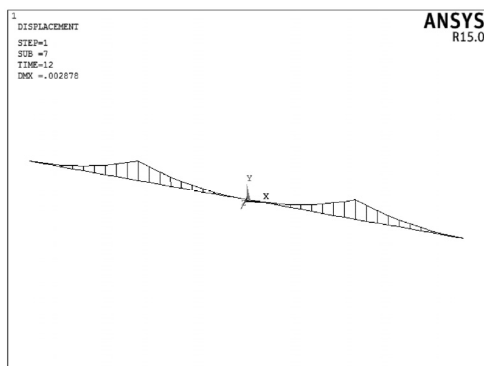


图 17-38　最终位移

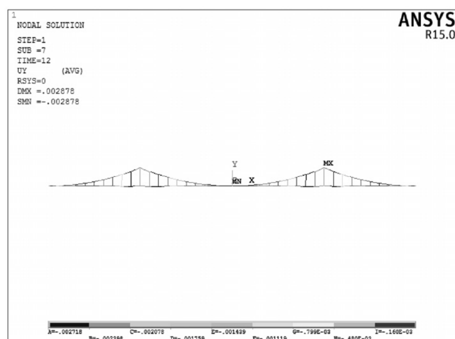


图 17-39　变形云图

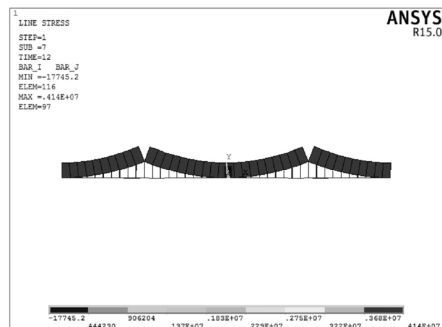


图 17-40　主揽轴力图

17.2.8 悬索桥的地震动力响应

跨度大的桥梁，其动力响应分析显得格外重要。现在就竖向地震加速度下的桥梁动力响应进行分析。

（1）生成地震波加速度文件

预先将地震波文件放入工作目录下。通过以下命令将其导入加速度文件以备调用。

```
*DIM，AAY1，ARRAY，2，50                              !定义地震波向量维度
*CREATE，ANSUITMP                                    !生成 input 文件
*VREAD，AAY1(1，1)，ACELY，TXT，，50                   !读入地震波文本文件
(E9.3，E11.3)
*END
/INPUT，ANSUITMP                                     !导入定义完成的 input 文件
```

（2）设置求解项并导入地震波加速度

命令流如下：

```
/SOLU                                !进入求解器
ANTYPE，TRANS                        !定义为瞬态分析
*DO，I，1，50
TIME，I*0.1                          !时间步长
AUTO，OFF                            !
DELTIM，0.05                         !
KBC，0                               !
OUTRES，BASIC                        !
ACEL，，-AAY1(2，I)，                  !导入地震加速度
SOLVE                                !求解
*ENDDO
```

（3）查看计算结果

通过时间历程后处理，查看各分析项的时间历程曲线。

```
/POST26                              !进入时间历程后处理
/XRANGE，0，5.5                       !设定坐标范围
!显示位移
/AXLAB，Y，U                          !定义 Y 轴显示名称
NSOL，2，1，U，Y，UY_2                  !定义变量 2 为 Y 向位移
PLVAR，2                             !绘制变量 2 时程曲线
!显示支反力
```

```
/AXLAB，Y，RF                          !重新为 Y 轴命名
RFORCE，3，21，F，X，FX_3              !定义支反力为变量 3，4
RFORCE，4，21，F，Y，FY_4
PLVAR，3                               !绘制变量 3，4
PLVAR，4                               !
FINISH
```

跨中位移时程曲线如图 17-41 所示，主塔支反力时程曲线 RFX 如图 17-42 所示。

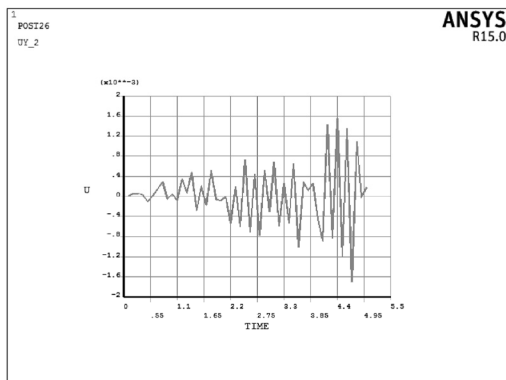


图 17-41 跨中位移时程曲线

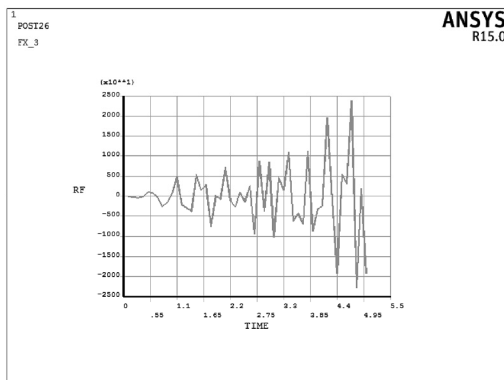


图 17-42 主塔支反力时程曲线 RFX

主塔支反力时程曲线 RFY 如图 17-43 所示。

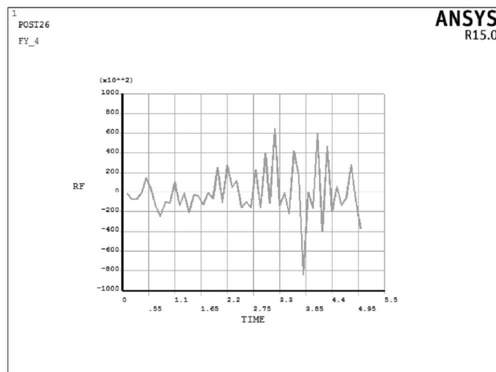


图 17-43 主塔支反力时程曲线 RFY

17.3 本章小结

本章主要学习了桥梁工程相关问题的建模及分析方法。

首先对钢桁架桥进行了建模及静力分析。关于通过节点生成桥面板单元的应用，用户应该掌握其方法。其次对大跨度悬索桥进行了建模分析，通过对模型的单元生死设置，以及自重分析，完成了主索的找形分析。然后进行了施工的模拟、外荷载静力分析和地震动力响应分析。

桥梁工程的形式多样，用户应熟练掌握并理解本章提供的复杂建模的方法和结构分析的思路，在实际应用中才能结合不同的工程情况合理建模。

第 18 章　隧道工程实例分析



与桥梁工程类似，隧道工程是土木工程中与交通直接相关的另一种重要工程形式。随着经济的发展，快捷便利的交通已经越来越受到重视，而山岭隧道、地下铁路隧道等，可以真正地将阻碍变为通路。本章将对这些工程进行仿真分析。

本章学习目标

- 学习隧道的建模方法。
- 掌握山体隧道的开挖模拟及生死单元法。
- 掌握地铁站台的建模方法及地震荷载加载方法。

18.1　山体隧道开挖

隧道是埋置于底层内的一种地下建筑物。隧道大部分的功能为提供行人、脚踏车（自行车）、一般道路交通、机动车、铁路交通或运河使用，而部分隧道只运送水、石油或其他特定服务，包括军事及商业物流等。

18.1.1　隧道开挖问题

隧道可分为山岭隧道、水底隧道和地下隧道等。

隧道的结构包括主体建筑物和附属设备两部分。主体建筑物由洞身和洞门组成，附属设备包括避车洞和防排水设施，长的大隧道还有专门的通风和照明设备。

建造隧道方法多样。按开挖断面形式不同分为全断面法和分部开发挖法。深度浅的隧道可先开挖后覆盖，称为明挖回填式隧道；先兴建从地表通往地下施工区的竖井，再直接从地下持续开挖的称为钻挖式隧道；建造海底隧道可用沉管式隧道。

18.1.2　问题简述

某山岭公路隧道，其洞口截面形式如图 18-1 所示。通过 ANASYS 可以进行其开挖过程模拟及各进度时的受力状态分析。



图 18-1　某公路隧道

（1）几何尺寸

洞高 6.7m，最大宽度 3.11m。整个模型去宽 54.9m，高 48.15m，深 50m 的隧道及周围岩土。其模型正立面示意如图 18-2 所示。隧道示意图如图 18-3 所示。

（2）单元及材料属性

本例拟采用由面拉伸成体的建模方式。因此在建立面模型时使用 MESH200 单元。

隧道壁采用 SHELL181 单元。弹性模量 3E10，泊松比 0.2，材料密度 2500；

岩石采用 SOLID185 单元，弹性模量 4.5E8，泊松比 0.32，密度 2700。

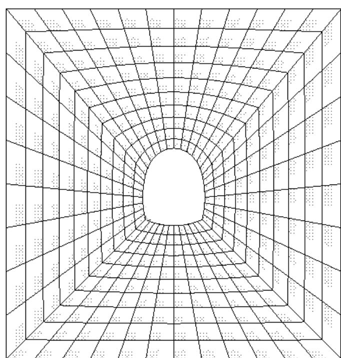


图 18-2　隧道立面模型示意图

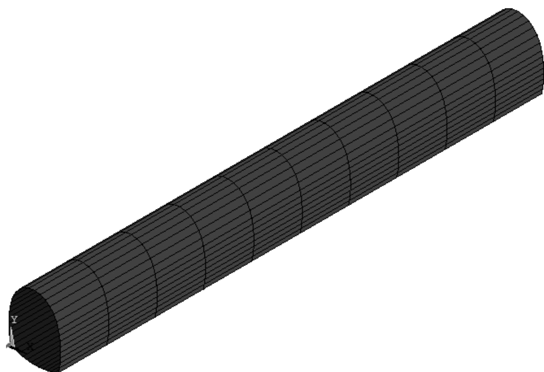


图 18-3　隧道示意图

18.1.3 前处理

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 Tunnel excavation。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

2）定义单元类型。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>Add/Edit/ Delete，单击 Add 按钮添加非求解单元 not solved>mesh facet 200 为 1 号单元。

回到 Element Types 对话框，选中 MESH200，单击 Options 按钮，设置其 K1 值为 3D LINE 2 NODE。再添加另一 MESH200 单元为 2 号单元，在 Options 中设置其 K1 为 QUAD 4 NODE。

添加单元 SHELL181 为 3 号单元，添加 SOLID185 为 4 号单元，单击 OK 按钮退出。

3）定义材料属性。本例需要定义 3 种材料，隧道壁为混凝土材料，周边岩体材料，以及隧道内挖去的岩石材料。

设定混凝土弹性参数。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。

选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，EX：3E10；PRXY：0.2；单击 OK 按钮完成设置。

在 Material Models Available> Structural>Density 中设定材料密度 2500。单击 OK 按钮完成设置。

为岩体定义材料参数。EX：4.5E8；PRXY： 0.32；密度 2700。单击 OK 按钮完成设置。挖除的岩石材料 EX：4.51E8；PRXY： 0.32；密度 2700。

4）实常数。为应用板壳单元的混凝土壁设置厚度。通过路径 Main Menu>Preprocessor>

Real Constants> Add/Edit/Delete，添加厚度 R，1，0.4。

单元及材料设定命令流：

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7                              !进入前处理
ET，1，MESH200，2                    !用于三维的 2 节点线
ET，2，MESH200，6                    !用于三维的 4 节点四边形
ET，3，SHELL181                      !用于混凝土壁的壳单元
ET，4，SOLID185                      !岩石
R，1，0.4                            !壳的厚度
MP，EX，1，3.0E10                    !壳的材料，C30 混凝土
MP，PRXY，1，0.2
MP，DENS，1，2500
MP，EX，2，4.5E8                     !保留岩石的材料
MP，PRXY，2，0.32
MP，DENS，2，2700
MP，EX，3，4.51E8                    !挖去岩石的材料
MP，PRXY，3，0.32
MP，DENS，3，2700
```

5）建模。由下至上建模过程，先生成关键点，路径为 Main Menu>Preprocessor> Modeling> Create> Keypoints>In Active CS。

再经过点生成弧线，路径为 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Lines>Arcs> Through 3 KPs。

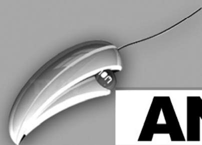
通过关键点生成面，路径为 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Arbitrary> Through KPs。

至此生成隧道部分的面。

再通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>Areas>Rectangle>By 2 Corners，生成周边的岩体面模型。

命令流如下：

```
K，，0，0                            !生成关键点
K，，0，3.85
K，，0.88，5.5
K，，2.45，6.15
K，，4.02，5.5
K，，4.9，3.85
K，，4.9，0                          !定义两点之间的圆弧线
LARC，1，2，6，8.13
LARC，2，3，6，3.21
LARC，3，4，6，2.22
LARC，4，5，2，2.22
LARC，5，6，2，3.21
LARC，6，7，2，8.13
LARC，7，1，4，6                     !产生面 1
A，1，2，3，4，5，6，7               !产生面 2
BLC4，-12，-12，28.9，30.15          !产生面 3
BLC4，-25，-12，13，30.15            !产生面 4
BLC4，16.9，-12，13，30.15           !产生面 5
```



```
BLC4，-25，-30，54.9，18
/PNUM，AREA，1                              !布尔操作重叠，得到面 3
AOVL，1，2，3，4，5
NUMMRG，ALL，，，，LOW
NUMCMP，ALL
```

得到隧道几何模型如图 18-4 所示，全平面模型如图 18-5 所示。

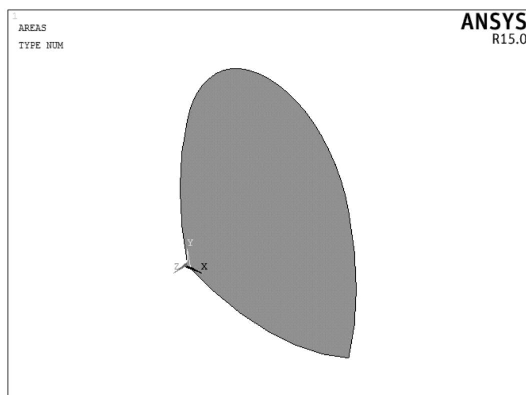


图 18-4　隧道几何模型

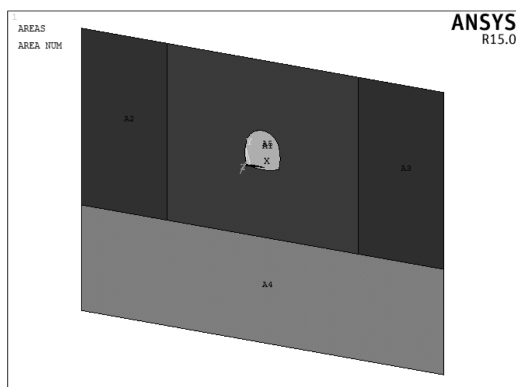


图 18-5　全平面模型

接下来，为现有的几何平面划分网格，并最终拉伸成体。

其中隧道口周边岩体，即面 5 有洞口，如图 18-6 所示。不方便划分，因此需要进行面的分割。从洞口 4 个角点向 4 个方向分出 4 条直线，如图 18-7 所示。

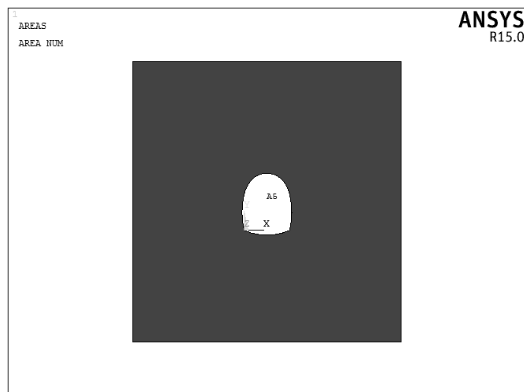


图 18-6　带洞口的面 5

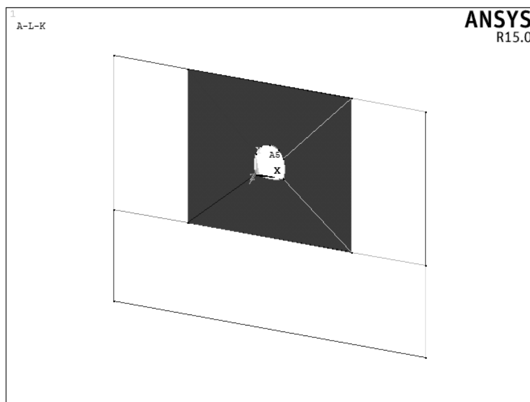


图 18-7　辅助切割直线

再利用直线进行面的切割。执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Booleans>Divide> Area by Line。切割后的模型如图 18-8 所示。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Meshing>Mesh>Areas>Mapped>Concatenate>Lines 将洞顶 4 段弧线连接成一条弧线。通过各边线进行网格尺寸控制，路径为 Main Menu> Preprocessor>Meshing>Size Cntrls>ManualSize>Lines>Picked Lines。为待划分的各面赋予相应的属性，路径为 Main Menu> Preprocessor>Meshing>Mesh Attributes>Picked Areas。

具体操作见命令流如下：



```
L，1，8                                  !从 4 个角点上连接出 4 条线
L，7，9
L，6，10
L，2，11
LSEL，S，LINE，，21，22，1                !用线分割面
LSEL，A，LINE，，7
ASBL，5，ALL                              !切分命令
LSEL，S，LINE，，21，24，3
LSEL，A，LINE，，1
ASBL，7，ALL
LSEL，S，LINE，，22，23，1
LSEL，A，LINE，，6
ASBL，8，ALL
NUMMRG，ALL，，，，LOW                     !对重合的各元素及编号进行合并处理
NUMCMP，ALL
LSEL，S，LINE，，2，5，1                  !选择分段的弧线
LCCAT，ALL                                !进行线的连接
LESIZE，ALL，，，3                        !设定直线划分份数
LSEL，S，LINE，，9，11，2
LSEL，A，LINE，，6
LSEL，A，LINE，，1
LESIZE，ALL，，，8
LSEL，S，LINE，，8，10，2
LSEL，A，LINE，，7
LESIZE，ALL，，，12
LSEL，S，LINE，，21，24，1
LESIZE，ALL，，，10，2
!对面进行划分
TYPE，2                                   !为待划分的面设定单元类型
ASEL，S，AREA，，5，8，1                  !选择面 5～8
AMESH，ALL                                !划分面
ASEL，S，AREA，，1
AMESH，1
LSEL，S，LINE，，12，13，1                !通过直线控制划分份数
LESIZE，ALL，，，8
LSEL，S，LINE，，15，18，1
LESIZE，ALL，，，6，2
ASEL，S，AREA，，2，3，1
AMESH，ALL
LSEL，S，LINE，，14
LESIZE，ALL，，，24
LSEL，S，LINE，，19，20，1
LESIZE，ALL，，，6，2
LSEL，S，LINE，，15，17，2
LSEL，A，LINE，，8
LCCAT，ALL                                !连接直线
ASEL，S，AREA，，4
AMESH，ALL
LSEL，S，LCCA                             !选择通过连接生成的直线
LDELE，ALL                                !删除直线
NUMMRG，ALL，，，，LOW
```

```
NUMCMP，ALL
ALLSEL
```

至此，得到平面模型，如图 18-9 所示。

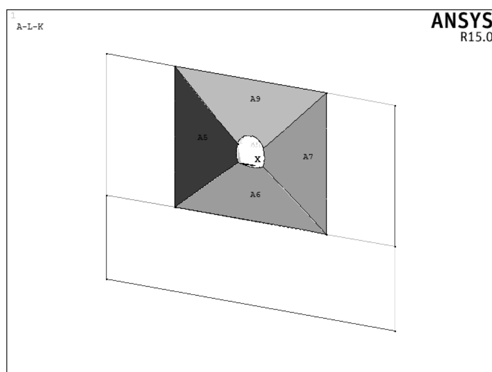


图 18-8　切割后的面

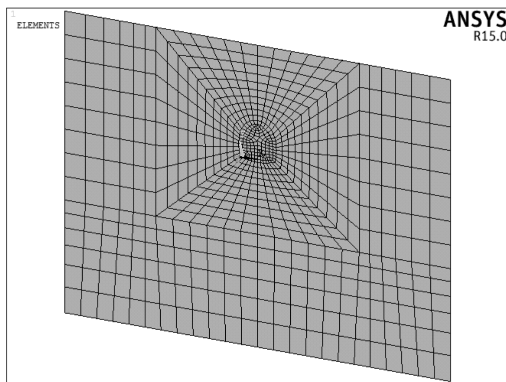


图 18-9　划分网格后的平面模型

接下来，将已划分好的平面模型拉伸为立体。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling> Operate>Extrude>Elem Ext Opts，设置拉伸方向的网格数为 10。

通过路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Lines>Along Lines，选择隧道壁弧线，将其拉伸为沿洞深的隧道护壁面。再为其设定单元类型为 SHELL181，划分网格。

其他岩体部分的拉伸方法类似，只是均由面拉伸成体，并且直接赋予单元类别及材料属性。

执行路径 Main Menu>Preprocessor>Modeling>Operate>Extrude>Areas>Along Lines。

命令流如下：

```
!首先拉伸成壳单元
K，1000，，，-50                    !定位辅助点
L，1，1000
/VIEW，1，1，1，1
/REPLOT
EXTOPT，ESIZE，10，0，              !设置拉伸的单元份数
LSEL，S，LINE，，1，7，1            !选择洞壁线
ADRAG，ALL，，，，，，25             !拉伸
GPLOT
TYPE，3                             !设置单元类型
REAL，1                             !实常数
MAT，1                              !材料种类
ASEL，S，LOC，Z，-25                !选择隧道壁
APLOT
LSEL，S，LOC，Z，-25                !
LESIZE，ALL，，，10                 !设置划分份数
MSHAPE，0，2D
MSHKEY，1
AMESH，ALL                          !划分洞壁单元
!拉伸岩石的实体
                                    !反选当前面
```

```
ASEL，INVERT                              !得到岩体面
APLOT                                     !设置拉伸属性
EXTOPT，ESIZE，10，0，
EXTOPT，ACLEAR，1
TYPE，4
MAT，2
ASEL，R，AREA，，2，8，1                   !拉伸
VDRAG，ALL，，，，，，25
ALLSEL
!挖去部分岩石的实体
MAT，3
VDRAG，1，，，，，，25
EPLOT
NUMMRG，ALL，，，，LOW
NUMCMP，ALL
```

得到的岩壁模型如图 18-10 所示，拉伸后的有限元模型如图 18-11 所示。

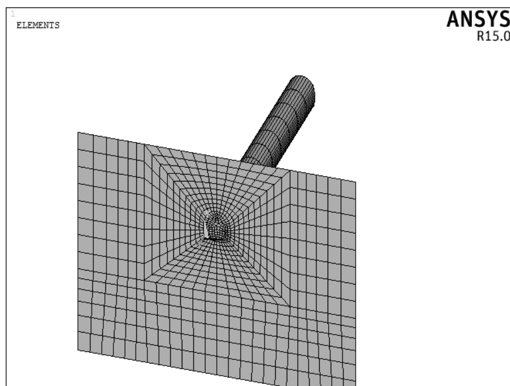


图 18-10 岩壁模型

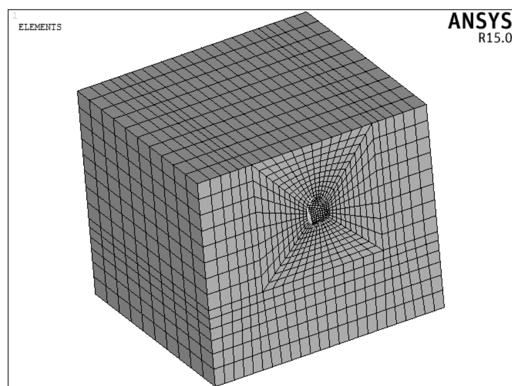


图 18-11 有限元模型

18.1.4 求解选项及边界条件设置

（1）设置求解选项

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置分析类型为 STATIC。

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Basic，在 Basic 选项卡中打开大变形分析 Large Displacement Static，打开自动时间步长 Automatic time stepping on，设置时间增量为 0.1，最大时间步长为 0.2，最小时间步长为 0.05。

在 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Nonlinear 中，打开线性搜索与时间步长预测器。

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Analysis Options，设置 N-R 分析方法为 FULL N-R。

通过路径 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Nonlinear>Convergence Crit，设置收敛条件为 F，0.02。

（2）施加约束

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas，

约束两侧面的 X 方向的自由度；约束地面的 Y 方向的约束；约束模型前后两面的 Z 方向自由度。

（3）施加重力

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global，对模型施加重力，在 ACELY 中输入 10。

约束后的模型如图 18-12 所示。

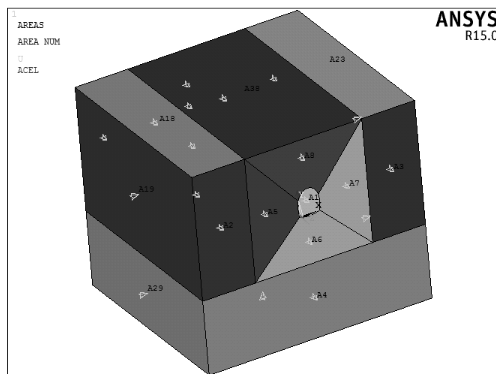


图 18-12　施加约束和重力的模型

本段命令流如下：

```
/SOLU                                  !进入求解模块
ANTYPE，STATIC                         !分析类型为静力
DELTIM，0.1，0.05，0.2                 !时间步长设置
AUTOTS，ON                             !使用自动时间步
PRED，ON                               !打开时间步长预测器
LNSRCH，ON                             !打开线性搜索
NLGEOM，ON                             !打开大位移效果
NROPT，FULL                            !设定牛顿-拉普森选项
CNVTOL，F，，0.02，2，0.5              !定义收敛准则
!约束两侧面的 X 方向的约束
ASEL，S，LOC，X，-25                   !选择两侧面
ASEL，A，LOC，X，-25+54.9
DA，ALL，UX，0                         !约束 UX
ALLS
!约束地面的 Y 方向的约束
ASEL，S，LOC，Y，-30                   !选择底面
DA，ALL，UY，0                         !约束 UY
ALLS
!约束前后面 Z 方向的约束
ASEL，S，LOC，Z，-50                   !选择前后两面
ASEL，A，LOC，Z，0
DA，ALL，UZ，0                         !约束 UZ
ALLSEL
ACEL，，10                             !施加重力
FINI
```

18.1.5 基于单元生死的开挖过程求解

首先，要确定模型中各部分的生死过程。在施工前，要明确所有的混凝土壁是不存在的，而所有的岩体都是存在的，所有要先“杀死”所有壳单元部分，并将杀死单元的节点全部约束。然后求解，得到开挖前的初始状态。

选择单元：Utility Menu>Select>Entities

单元生/死命令路径：Main Menu>Solution>Load Step Opts>Other>Birth & Death>Kill Elements。

约束节点：Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Nodes。

求解：Main Menu>Solution>Solve>Current LS。

命令流如下：

```
ESEL，S，TYPE，，3                    !选择壳单元
EKILL，ALL                            !杀死壳单元
ESEL，ALL
ESEL，S，LIVE                         !选择活的单元
NSLE，S                               !选择活单元上的节点
NSEL，INVERT                          !反向选择，即选择了死单元上的节点
D，ALL，ALL，0                        !将死单元上的节点约束所有位移
NSEL，ALL
ESEL，ALL
/PBC，ALL，，1                        !显示边界条件
GPLOT
SOLVE                                 !求解
```

初步计算结果下的变形如图 18-13 所示，应力分布如图 18-14 所示。

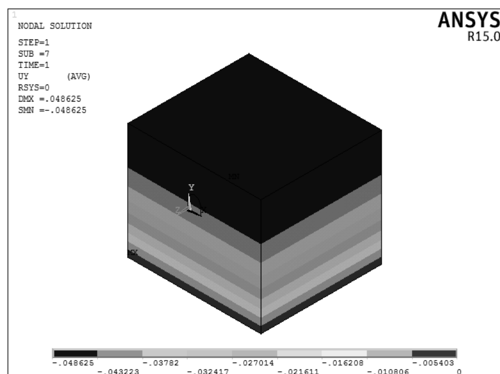


图 18-13 竖向位移云图

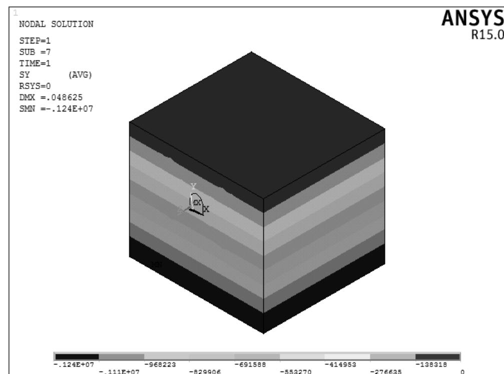


图 18-14 竖向应力云图

接下来进行正式的开挖过程。开挖过程的每一步都要杀死一部分洞内岩石单元，路径为 Main Menu> Solution>Load Step Opts>Other>Birth & Death>Kill Elements。

随后，激活相应部分的壳单元，路径为 Main Menu>Solution>Load Step Opts>Other>Birth & Death>Activate Elem。然后通过 Utility Menu>Select>Entities，选择当前活着的所有单元，反选得到杀死了的单元。这时需要在求解前将死单元上的所有节点再次全部约束起来。

之后就可以开始求解了。每一步开挖都遵循此过程，总共分 5 段开挖，每段挖 10m。

第一步开挖：

```
/SOLU
ESEL，S，MAT，，3                              !选择挖去的岩石，杀死
NSLE，S
NSEL，R，LOC，Z，0.1，-10.1
ESLN，R，1
EKILL，ALL
ESEL，S，TYPE，，3
NSLE，S
NSEL，R，LOC，Z，0.1，-10.1
ESLN，R，1                                    !激活挖去的岩石对应的壳单元
EALIVE，ALL
NSLE，S                                       !并将其节点上的约束删除
DDELE，ALL，ALL
ESEL，ALL                                     !选择活单元
ESEL，S，LIVE
NSLE，S                                       !反向选择
NSEL，INVERT                                  !将杀死单元上的节点约束所有自由度
D，ALL，ALL，0
NSEL，ALL
ESEL，ALL                                     !求解
SOLVE                                         !退出求解器
FINI                                          !进入一般后处理
/POST1                                        !选择最后一步
SET，LAST                                     !选择活单元
ESEL，S，LIVE                                 !选择活单元中的 3 单元
ESEL，R，TYPE，，3                            !绘制 Y 位移
PLNSOL，U，Y，0，1                            !绘制 Y 应力
PLNSOL，S，Y，0，1
FINI
```

得到第一步开挖的隧道计算结果，第一步开挖 UY 云图如图 18-15 所示，第一步开挖 SY 云图如图 18-16 所示。

接下来进行第二步的开挖，命令流如下：

```
/SOLU
ESEL，S，MAT，，3                              !选择挖去的岩石，杀死
NSLE，S
NSEL，R，LOC，Z，0.1-10，-20.1
ESLN，R，1
EKILL，ALL                                    !激活挖去的岩石对应的壳单元
ESEL，S，TYPE，，3                            !并将其节点上的约束删除
NSLE，S
NSEL，R，LOC，Z，0.1-10，-20.1
ESLN，R，1
EALIVE，ALL
NSLE，S
DDELE，ALL，ALL
ESEL，ALL                                     !选择活单元
ESEL，S，LIVE
NSLE，S                                       !反向选择
NSEL，INVERT                                  !将杀死单元上的节点约束所有自由度
```

```
D，ALL，ALL，0
NSEL，ALL
ESEL，ALL
SOLVE
FINI
/POST1
SET，LAST
ESEL，S，LIVE
ESEL，R，TYPE，，3
PLNSOL，U，Y，0，1
PLNSOL，S，Y，0，1
FINI
```

得到第二步开挖后的隧道计算结果，第二步开挖 UY 云图如图 18-17 所示，第二步开挖 MISES 应力如图 18-18 所示。

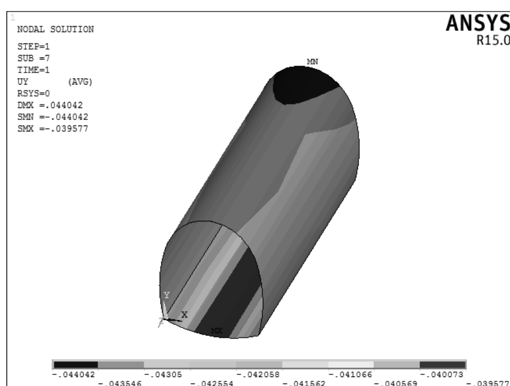


图 18-15　第一步开挖 UY 云图

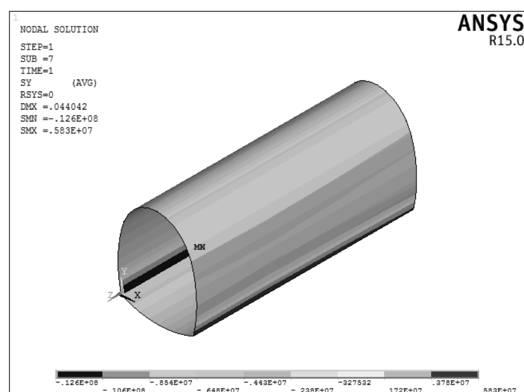


图 18-16　第一步开挖 SY 云图

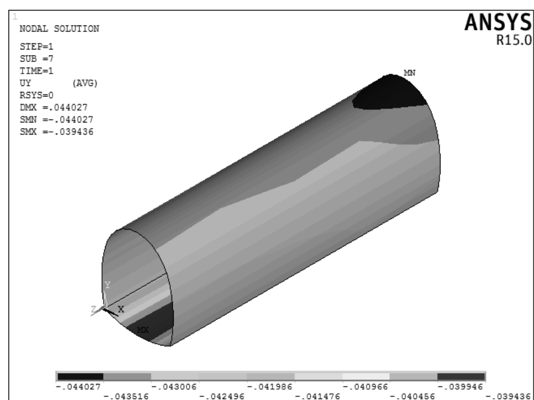


图 18-17　第二步开挖 UY 云图

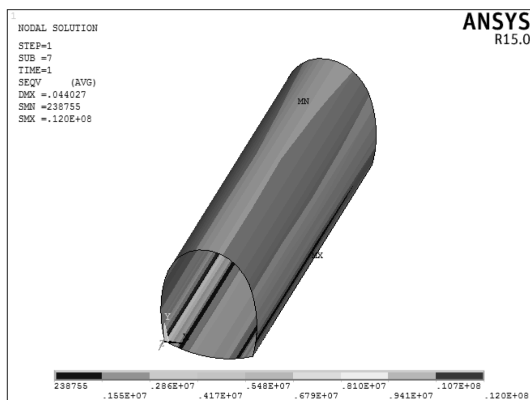
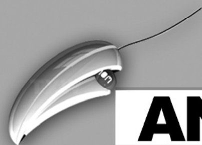


图 18-18　第二步开挖 MISES 应力

第三～五步开挖过程相似。第五步开挖结果：

```
/SOLU
ESEL，S，MAT，，3
NSLE，S                              !选择挖去的岩石，杀死
NSEL，R，LOC，Z，0.1-40，-50.1
ESLN，R，1
```



```
EKILL，ALL
ESEL，S，TYPE，，3
NSLE，S
NSEL，R，LOC，Z，0.1-40，-50.1
ESLN，R，1                                    !激活挖去的岩石对应的壳单元
EALIVE，ALL
NSLE，S                                       !并将其节点上的约束删除
DDELE，ALL，ALL
ESEL，ALL
ESEL，S，LIVE
NSLE，S                                       !反向选择，
NSEL，INVERT                                  !将杀死单元上的节点约束所有自由度
D，ALL，ALL，0
NSEL，ALL
ESEL，ALL
SOLVE
FINI
/POST1
SET，LAST
ESEL，S，LIVE
ESEL，R，TYPE，，3                             !VON MISES 应力
PLNSOL，U，Y，0，1
PLNSOL，S，EQV，0，1.0
FINI
```

第五步开挖 UY 云图如图 18-19 所示，第五步开挖 MISES 应力如图 18-20 所示。

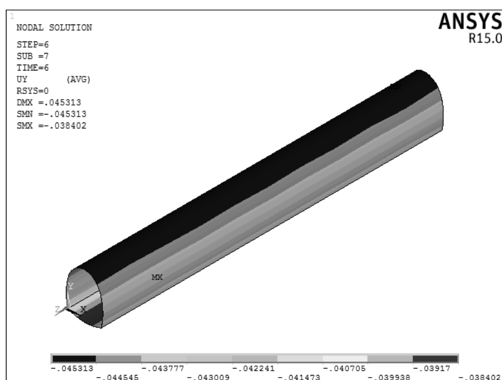


图 18-19　第五步开挖 UY 云图

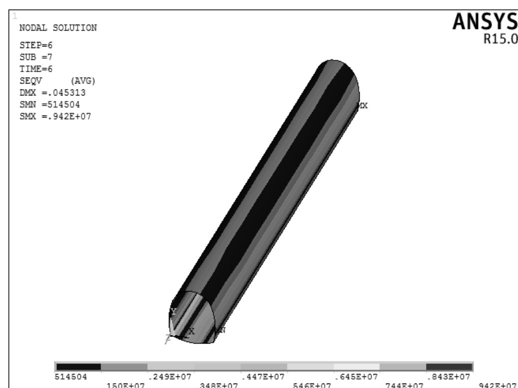


图 18-20　第五步开挖 MISES 应力

用户也可通过 APDL 的循环语句功能，完成开挖过程，命令流如下：

```
*DO，II，1，5，1                                              !开始 5 次循环
ESEL，S，MAT，，3                                             !选择要挖去的岩石单元
    NSLE，S                                                   !选择岩石单元上的节点
    NSEL，R，LOC，Z，0.1-(II-1)*10，-(10.1+(II-1)*10)          !选择第 II 步要开挖的部分
    ESLN，R，1                                                !依节点选择单元
    EKILL，ALL                                                !杀死单元
    ESEL，S，TYPE，，3                                        !选择挖去的岩石对应的壳单元
    NSLE，S
    NSEL，R，LOC，Z，0.1-(II-1)*10，-(10.1+(II-1)*10)
    ESLN，R，1
```

```
    EALIVE，ALL                        !激活挖去的岩石对应的壳单元
    NSLE，S
    DDELE，ALL，ALL                    !将激活的单元上的节点约束删除
    ESEL，ALL
    ESEL，S，LIVE                      !选择活单元
    NSLE，S
    NSEL，INVERT                       !反向选择
    D，ALL，ALL，0                     !将死单元上的节点约束所有自由度
    NSEL，ALL
    ESEL，ALL
SOLVE                                  !求解
*ENDDO                                 !结束
```

18.1.6 后处理

挖空后的模型如图 18-21 所示。

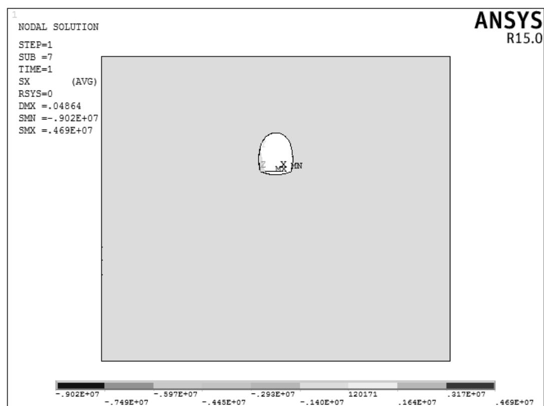


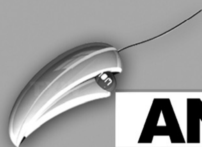
图 18-21 挖空后模型

本例主要分析对象为隧道，因此，先选中应用 SHELL181 单元的所有单元。路径为 Utility Menu> Select>Entities，Elements，By attribute ，Type num，在输入框中输入 3。打开等值线图，执行路径 Utility Menu> PlotCtrls>Device Options。

通过路径 Main Menu>General Postproc>Read Results>By Pick 选择要读取的数据。通过路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Contour Plot>Nodal Solu，绘制结果图。

命令流如下：

```
/post1                              !进入一般后处理
/DEVICE，VECTOR，1                  !打开等值线
ESEL，S，type，，3                  !选择壳单元
SET，2，LAST，1，                   !读入 SET2 数据
PLNSOL，U，Y，0，1                  !绘制 Y 方向变形
PLNSOL，S，EQV，0，                 !绘制 MISES 应力
!第 2 步开挖                         !以下注释类似
SET，3，LAST，1，
PLNSOL，U，Y，0，1
PLNSOL，S，EQV，0，
!第 3 步开挖
```



```
SET，4，LAST，1，
PLNSOL，U，Y，0，1
PLNSOL，S，EQV，0，
!第 4 步开挖
SET，5，LAST，1，
PLNSOL，U，Y，0，1
PLNSOL，S，EQV，0，
!第 5 步开挖
SET，6，LAST，1，
PLNSOL，U，Y，0，1
PLNSOL，S，EQV，0，
```

得到各开挖步的变形情况，第一步开挖 UY 等值线如图 18-22 所示，应力等值线如图 18-23 所示。

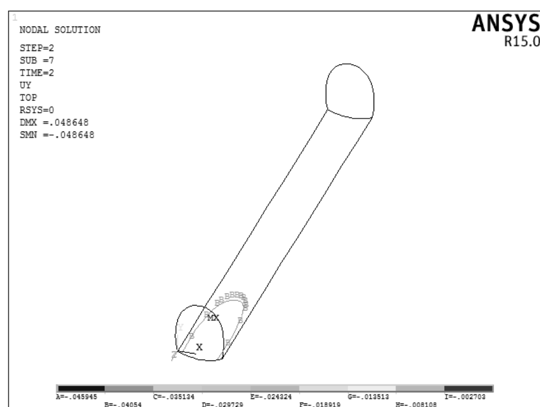


图 18-22　第一步开挖 UY 等值线

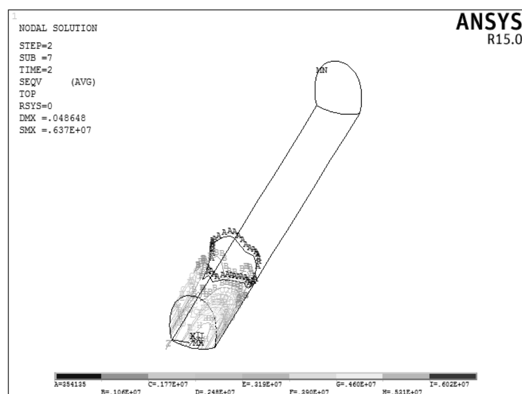


图 18-23　第一步开挖应力等值线

第二步开挖 UY 等值线如图 18-24 所示，第二步开挖应力等值线如图 18-25 所示。

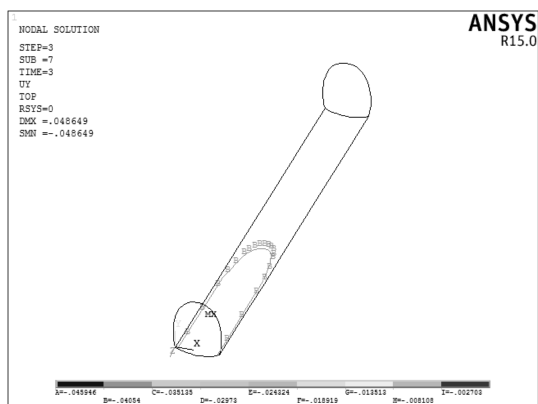


图 18-24　第二步开挖 UY 等值线

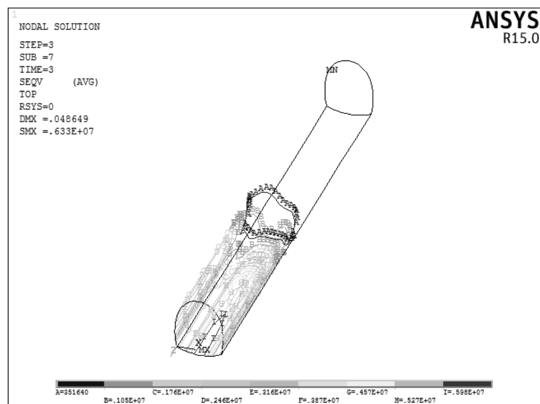


图 18-25　第二步开挖应力等值线

第三步开挖 UY 等值线如图 18-26 所示，第三步开挖应力等值线如图 18-27 所示。

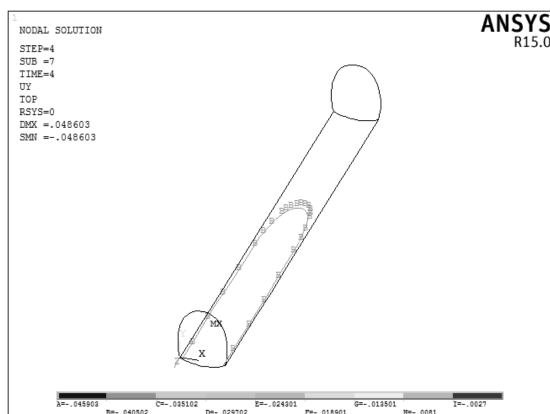


图 18-26　第三步开挖 UY 等值线

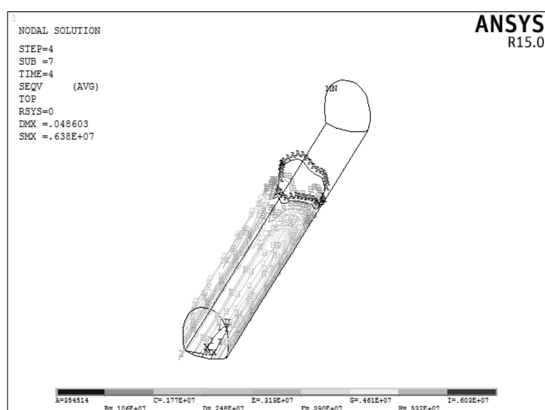


图 18-27　第三步开挖应力等值线

第四步开挖 UY 等值线如图 18-28 所示，第四步开挖应力等值线如图 18-29 所示。

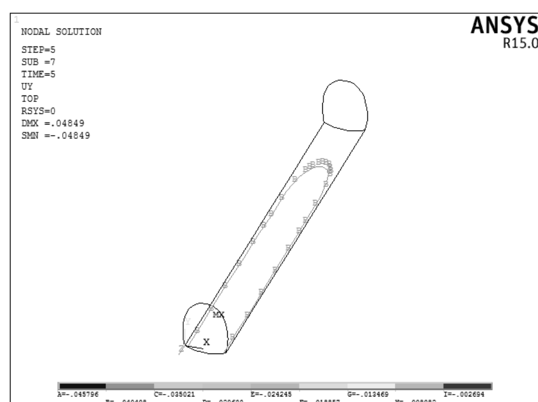


图 18-28　第四步开挖 UY 等值线

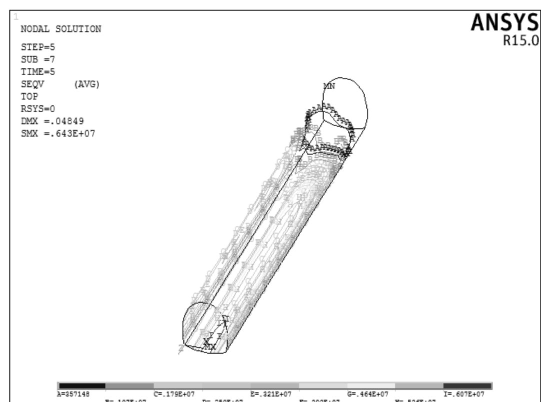


图 18-29　第四步开挖应力等值线

第五步开挖 UY 等值线如图 18-30 所示，第五步开挖应力等值线如图 18-31 所示。

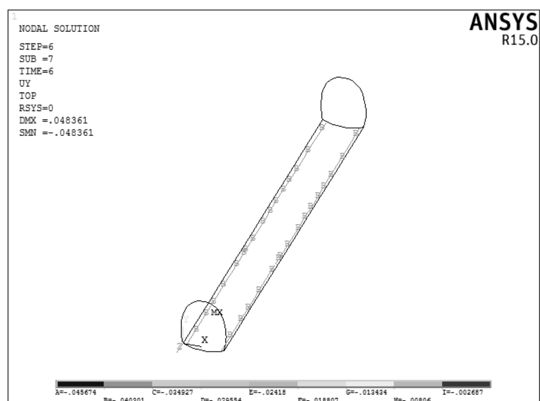


图 18-30　第五步开挖 UY 等值线

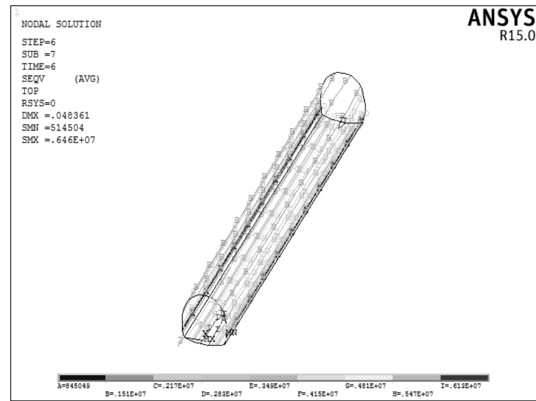


图 18-31　第五步开挖应力等值线

开挖模拟完成。

18.2 地铁站台的地震响应分析

随着城市建设的不断发展，城市规模日益扩大，地面空间和交通问题是影响城市发展的一个重要因素，建立地下交通体系已成为解决城市空间问题的一个十分有效的途径。

地铁与城市中其他交通工具相比，具有节省土地，大量节省通勤时间，减少噪声，减少与其他运输系统间的干扰，节约能源，减少污染等优点。因而地铁在世界上大多数经济发达地区的客运交通中发挥着不可替代的作用，被当做城市交通的骨干，用以解决交通堵塞问题。

18.2.1 相关知识

（1）地铁抗震重要性

地铁的广泛应用使得其安全性显得尤为重要。近年来的地震灾害现象表明，地下结构在强地震作用下可能会出现严重的震害及次生灾害，城市大型地下工程的抗震安全性已成为备受关注的社会问题之一。

客观地讲，地下结构由于受到地层的约束，加之城市隧道大多采用抗震性能较好的整体现浇钢筋混凝土结构及能够适应地层变形的装配式圆形结构，震害明显低于地上结构。但这并不意味着地下结构在地震时是安全的，历史上多次大地震中都曾出现较大震害。

（2）地下结构抗震分析方法

地下结构抗震分析方法主要有等效静力法、反应位移法和平面有限元动力计算。地铁规范给出的抗震设计方法为等效静力法。等效静力法大致与地面结构抗震设计的方法类似，没有考虑土与结构间的相互作用，其主要用于结构形式较为简单，重要程度不高，或仅需粗略估算地震荷载的情况。考虑了土与结构间的相互作用的方法典型的有反应位移法和有限元动力计算方法。本节以某地铁隧道为例，输入修正的埃尔森特罗地震波，进行了平面有限元动力计算分析。

利用有限元动力计算方法，相对于等效静力法和反应位移法，该方法能较为详细地反映周围地层的动力特性，从而使抗震计算更加精确。

18.2.2 问题简述

（1）模型尺寸

本例参考某地震振动台实验 1∶10 模型建立有限元模型。

模型尺寸为 2261mm×656mm×442mm，中柱横断面尺寸为 26mm×26mm，顶板、中楼板和底板厚度分别为 27mm，14mm，30mm，侧壁厚度为 20mm，柱间距为 266mm。振动台试验中的地铁车站模型如图 18-32 所示。

（2）单元选择及材料参数

车站选择 SHELL181 单元，中柱选择 BEAM188 单元，土选择实体 SOLID65 单元。

站台混凝土参数：弹性模量 3E10，泊松比 0.2，密度 2500。

土体：弹性模量 15.3E6，泊松比 0.36，密度 1910。粘聚力 61E3，摩擦角 19.5°。



图 18-32　振动台实验模型

（3）地震波

对模型施加 EI-Centro 波水平加速度。其时程曲线如图 18-33 所示。

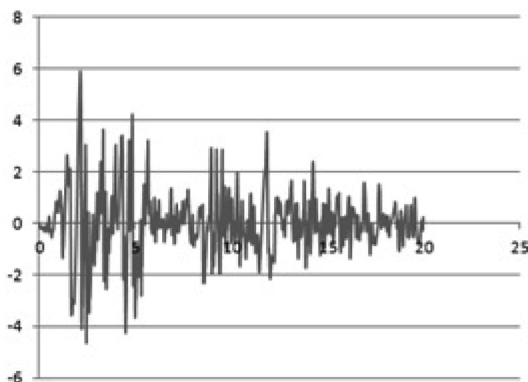


图 18-33　EI-Centro 时程曲线

其中横轴为时间 s，纵轴为加速度 m/s^2。

鉴于本例建模复杂，需要调用文件且需要借助循环语句，本例采用命令流方式进行分析。

18.2.3 前处理

1）运行 ANSYS 15.0，设置工作名 Tunnel1。单击 RUN 按钮进入 GUI，单击 Preferences 按钮选择 Sructural 选项。

2）定义单元类型。通过路径 Main Menu >Preprocessor>Element Type>Add/Edit/ Delete，单击 Add 按钮添加单元 SOLID65 为 1 号单元。添加单元 SHELL181 为 2 号单元。

3）定义材料属性。本例需要定义两种材料，车站为混凝土材料，周边土体为采用 DP 模型的材料。

设定混凝土弹性参数。通过路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models，弹出 Define Material Model Behavior 对话框。选择对话框右侧 Material Models Available> Structural>Linear>Elastic>Isotropic 选项，双击后在对话框输入数值，EX：30E9；PRXY：0.2；单击 OK 按钮完成设置。在 Material Models Available> Structural>Density 中设定材料密度

2500。单击 OK 按钮完成设置。

为土体定义材料参数。EX：15.3E6；PRXY：0.36；密度 1910。单击 OK 按钮完成设置。设定 DP 参数。选择对话框右侧 Material Models Available>Structural>Nonlinear>Inelastic> Non-metal Plastic> Drucker-Prager，依次输入 Cohesion=61E3，Fric Angle=19.5。

4）实常数。为应用板壳单元的各梁板构件设置厚度。通过路径 Main Menu> Preprocessor> Real Constants>Add/Edit/Delete，添加顶板厚度 R，1，0.027；中楼板的板厚 R，2，0.014；底板厚度 R，3，0.030；侧壁厚度 R，4，0.020。

5）定义截面。为隧道中间柱设定矩形柱截面。通过路径 Main Menu>Preprocessor> Sections>Beam> Common Section，设定截面形状为矩形，B=H=0.026。

命令流如下：

```
FINISH
/CLEAR
/PREP7                                    !进入前处理
!定义单元类型
ET，1，SOLID65
ET，2，SHELL181
ET，3，BEAM188
!定义实常数
R，1，0.027                               !顶板厚度
R，2，0.014                               !中楼板的板厚
R，3，0.030                               !底板厚度
R，4，0.020                               !侧壁厚度
SECTYPE，  1，BEAM，RECT，，0              !定义截面
SECOFFSET，CENT
SECDATA，0.026，0.026，0，0，0，0，
0，0，0，0，0，0                           !地铁车站材料特性
MP，EX，1，3E10
MP，NUXY，1，0.2                           !土体材料特性
MP，DENS，1，2500
MP，EX，2，15.3E6
MP，NUXY，2，0.36
MP，DENS，2，1910
TB，DP，2，，，
TBDATA，2，61E3， 19.5，
```

6）建几何模型。建模采用 APDL，首先根据车站各部分尺寸，预设变量值，这样在定义关键点位置时就可以直接使用计算式。命令流如下：

```
AA=0.656                                  !地铁车站模型的宽
BB=0.442                                  !地铁车站模型的高
CC=0.014                                  !中楼板的板厚
DD=0.020                                  !侧壁厚度
EE=0.026                                  !中柱横截面长，宽
FF=0.266                                  !柱间距
GG=0.027                                  !顶板厚度
HH=0.030                                  !底板厚度
LL=2.261                                  !车站模型的长
MM=0.3325                                 !最外中柱距车站端面的距离
KK=2.5                                    !土的宽
NN=1.2
```

```
!地铁车站                                          !土的高
K，1，(AA/2-DD/2)，(BB/2-GG/2)，，
K，2，-(AA/2-DD/2)，(BB/2-GG/2)，，                 !生成关键点
K，3，-(AA/2-DD/2)，-(BB/2-GG/2)，，
K，4，(AA/2-DD/2)，-(BB/2-GG/2)，，
K，5，(AA/2-DD/2)
K，6，-(AA/2-DD/2)
L，1，2                                            !生成直线
L，2，3
L，3，4
L，4，1
L，6，5
K，7，AA，，，
K，8，AA，，-LL，
L，7，8
ADRAG，1，2，3，4，，，6                           !拖拽直线生成面
ADRAG，5，，，，，，，6
LDELE，6，，，1
AGLUE，1，2，3，4，5                               !粘接 5 个面
NUMCMP，ALL
K，13，0，0，-MM
K，14，0，(BB/2-GG/2)，-MM
L，13，14
LGEN，7，21，，，，，-FF
LGEN，2，21，27，1，，-(BB/2-GG/2)，               !注释同上
!建立土模型
K，1801，(AA/2-DD/2)
K，1802，KK/2
K，1803，KK/2，NN/2
K，1804，(AA/2-DD/2)，NN/2
K，1805，，NN/2
K，1806，，(BB/2-GG/2)
K，1807，，(BB/2-GG/2)，-LL
K，1808，(AA/2-DD/2)，(BB/2-GG/2)
L，1804，1801
L，1801，1802
L，1802，1803
L，1803，1804
L，1805，1804
L，1804，1808
L，1808，1806                                      !线围成面
L，1806，1805
L，1806，1807
AL，35，38，37，36                                 !拖拽成体
AL，39，40，41，42
ASEL，S，，，8，9，1
CM，AA2，AREA                                      !镜像生成体
VDRAG，AA2，，，，，，43
VSEL，S，，，1，2，1
CM，VV1，VOLU
VSYMM，X，VV1
VSEL，S，，，1，4，1
```



```
CM，VV2，VOLU
VSYMM，Y，VV2
ALLSEL，ALL
AOVLAP，ALL
VGLUE，ALL                          !粘接
NUMMRG，KP                          !合并重复点
NUMCMP，ALL                         !压缩编号
```

得到地铁站几何模型如图 18-34 所示，地基及隧道模型如图 18-35 所示。

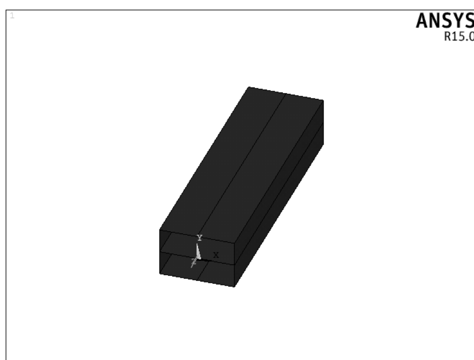


图 18-34　车站几何模型

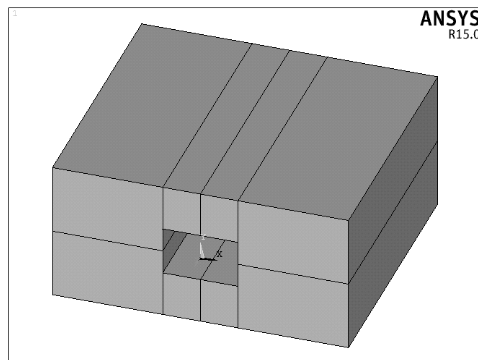


图 18-35　地基及隧道模型

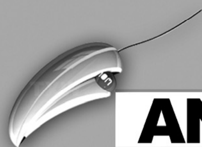
7）划分网格。

```
!划分梁单元
LSEL，S，，，21，34，1              !选择梁单元直线
CM，LL1，LINE                      !生成线集合
LATT，1，，3，，，，1               !赋属性
LESIZE，LL1，，，5                 !控制单元划分尺寸
LMESH，ALL                         !划分梁单元
!划分壳单元
LSEL，ALL                          !顶板
LSEL，S，，，6，7，1                !
LSEL，A，，，42
CM，LL2，LINE                      !生成线集合
LESIZE，LL2，0.0665                !控制单元划分尺寸
LSEL，ALL
LSEL，S，，，1，2，1
LSEL，A，，，40，52，12
CM，LL3，LINE
LESIZE，LL3，，，5                 !选择顶板面
ASEL，ALL
ASEL，S，，，2，14，12
CM，AAA1，AREA                     !赋予顶面属性
AATT，1，1，2                      !划分顶板
AMESH，AAA1
!中楼板
LSEL，ALL
LSEL，S，，，12，13，1
CM，LL4，LINE
```



```
LESIZE，LL4，0.0665
LSEL，ALL
LSEL，S，，，3，11，8
CM，LL5，LINE
LESIZE，LL5，，，10
ASEL，ALL
ASEL，S，，，3
AATT，1，2，2
AMESH，3
!底板
LSEL，ALL
LSEL，S，，，5，9，4
LSEL，A，，，74，76，2
CM，LL6，LINE
LESIZE，LL6，，，5
LSEL，ALL
LSEL，S，，，8，10，2
LSEL，A，，，75
CM，LL7，LINE                                   !
LESIZE，LL7，0.0665                             !
ASEL，ALL
ASEL，S，，，24，30，6
CM，AAA2，AREA
AATT，1，3，2
AMESH，AAA2
!侧板
LSEL，ALL
LSEL，S，，，14，20，2
LSEL，A，，，15，19，2
LSEL，A，，，4
CM，LL8，LINE
LESIZE，LL8，，，5                              !打开智能划分
ASEL，ALL                                       !选择体
ASEL，S，，，4，7，1
CM，AAA3，AREA                                  !赋属性
AATT，1，4，2                                   !扫掠网格
AMESH，AAA3
!划分体单元
ALLSEL，ALL
SMRT，1
VSEL，S，，，1，8，1
CM，VV3，VOLU
VATT，2，，1
VSWEEP，VV3
NUMMRG，ALL
NUMCMP，ALL
FINISH
```

最后生成地铁站台有限元模型如图 18-36 所示，整体模型如图 18-37 所示。



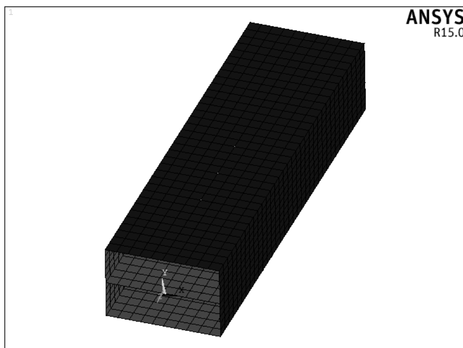


图 18-36　站台有限元模型

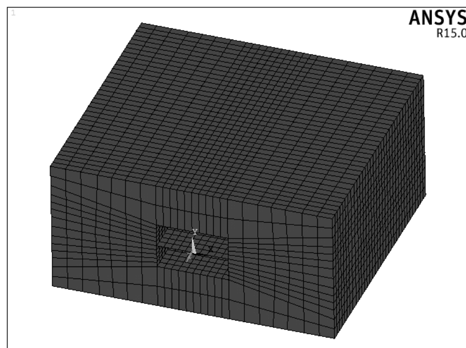


图 18-37　整体模型

站台细部构造如图 18-38 所示，站台柱如图 18-39 所示。

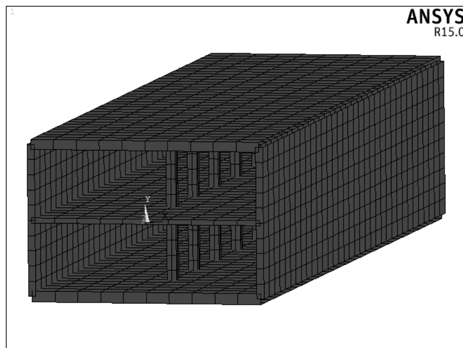


图 18-38　按单元形状显示的站台

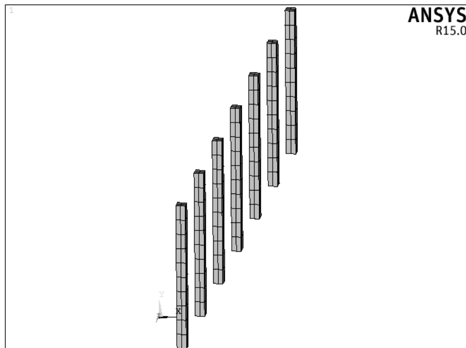


图 18-39　按单元形式显示的站台柱

18.2.4　加载及求解

（1）施加约束及重力荷载

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Inertia>Gravity>Global 施加重力 ACELY=9.8。

通过路径 Main Menu>Solution>Define Loads>Apply>Structural>Displacement>On Areas，拾取模型底面，施加 UY=0 约束；拾取两侧面，施加 UX=0 约束；拾取前后两立面，施加 UZ=0 约束。

具体命令流如下：

```
/SOLU                                  !进入求解模块
NSEL，ALL                              !选择所有节点
ACEL，0，9.8，0，                      !施加重力加速度
ASEL，S，，，21，22                    !选择底面
ASEL，A，，，28，35，7
DA，ALL，UY，                          !约束 Y 方向自由度
ASEL，S，，，10，18，8                 !现在侧面
ASEL，A，，，31，34，3
DA，ALL，UX，                          !约束 X 方向自由度
```

```
ASEL，S，，，1，8，7                    !选择地铁站台附近前后面
ASEL，A，，，16，26，10
ASEL，A，，，27，33，6
ASEL，A，，，36，45，9
DA，ALL，UZ，                           !约束Z方向自由度
FINISH                                  !退出求解模块
```

约束完后得到模型如图 18-40 所示。

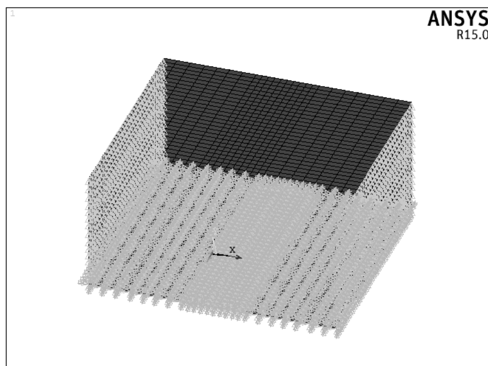


图 18-40　约束模型

（2）读入加速度时程

读入加速度时程前，要先将地震波时程文件放到指定文件夹中，以便调用。存放位置可在调用时自行设定，无特别规定。调入命令流如下：

```
ALLSEL
*DIM，SHUIPING，ARRAY，2，1000         !定义数据矩阵
*CREATE，ANSUITMP                      !生成文件
*VREAD，SHUIPING(1，1)，SHUIPING，     !读入时程文件
 TXT ， E:\ANSYS 15.0\EXAMPLE\C12\
 C12.1，1000，                          !读入完毕
(E9.3，E11.3)                           !输入数据
*END
/INPUT，ANSUITMP
```

地震波时程文件数据附在本书光盘中。

（3）设置求解选项

通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>New Analysis，设置分析类型为 Transient。通过路径 Main Menu>Solution>Analysis Type>Sol'n Controls>Transient，设定 Full Transient option 为 stepped loading。

调入地震波水平加速度时程文件，以文件内数据为每一步的加速度，荷载的时间间隔为 0.02s，共 50 步。循环加载方式采用 APDL 的循环语句。具体如下：

```
/SOLU                                   !进入求解模块
ANTYPE，4                               !分析类型为 Transient
TRNOPT，FULL                            !设定分析项
LUMPM，0
*DO，T，1，50，1                        !循环读入地震波加速度时程文件数据
TIME，0.02*T                            !每一步间隔 0.02s
```

```
KBC，1                                  !荷载设置
NSUB，1                                 !子步数 1
ACEL，SHUIPING(2，T)                    !读入加速度
ALPHAD，0.069                           !质量矩阵
BETAD，0.035                            !刚度
SOLVE                                   求解
*ENDDO                                  !结束循环
FINISH
```

求解结束。

18.2.5 一般后处理

进行一般后处理，主要查看地铁站的状态。

```
/POST1                                  !进入一般后处理
SET，LAST                               !最后一步数据
PLNSOL，U，SUM                          !整体变形
ESEL，S，TYPE，，2                      !拾取车站部分
PLNSOL，U，X                            !变形云图
PLNSOL，U，Y
PLNSOL，U，Z
PLNSOL，S，X，0，1                      !应力云图
PLNSOL，S，Y，0，1
PLNSOL，S，Z，0，1
PLNSOL，S，1，0，1
ESEL，S，TYPE，，3                      !拾取柱
ETABLE，FI，SMISC，1
ETABLE，FJ，SMISC，7
PLLS，FI，FJ，0.2                       !查看轴力
```

分析后得到各项结果如下。

（1）整体变形

水平地震加速度下，模型的沉降如图 18-41 所示，整体变形如图 18-42 所示。

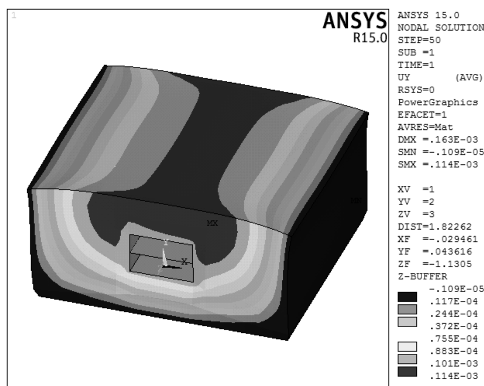


图 18-41　UY 云图

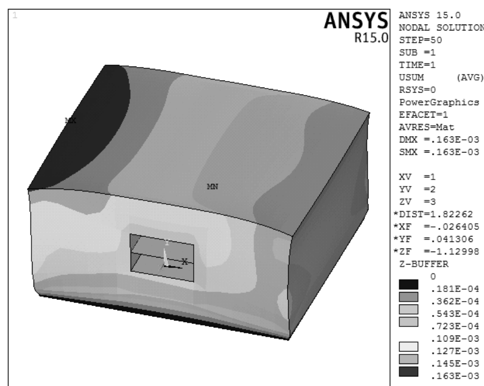


图 18-42　U SUM 云图

（2）车站应力分布

X 方向剪力如图 18-43 所示，第一主应力如图 18-44 所示。

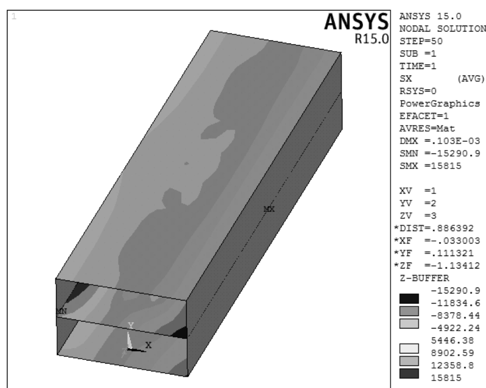


图 18-43 SX 云图

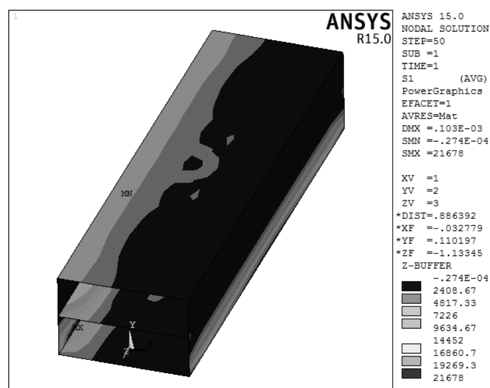


图 18-44 S1 云图

（3）柱子轴力

柱子轴力如图 18-45 所示。

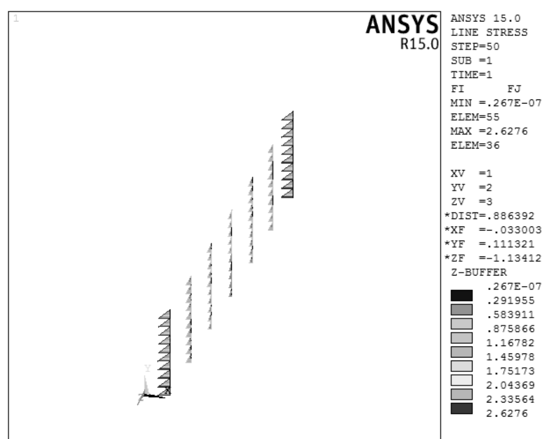


图 18-45 柱子轴力

地震分析主要进行时间历程后处理分析，此处不做过多的一般后处理。

18.2.6 时间历程后处理

以模型正中的点为特征点，即 NODE19，进行地震的时间历程分析。

（1）站台中心竖向位移、速度及加速度分析

```
/POST26                              !进入时间历程后处理
/XRANGE，0，1.2                      !设置坐标显示范围
!竖向位移
/AXLAB，Y，UY                        !定义坐标轴名称
NSOL，2，19，U，Y，UY_2              !导入节点 19 的 Y 向位移数据结果为变量 2
PRVAR，2                             !列表显示变量 2 信息
PLVAR，2                             !绘图显示变量 2 信息
!速度
```

```
/AXLAB，Y，VY
DERIV，3，2，1，，，，，1
PRVAR，3
PLVAR，3
!加速度
/AXLAB，Y，AY
DERIV，4，3，1，，，，，1
PRVAR，4
PLVAR，4
```

得到竖向位移时程曲线如图 18-46 所示，竖向速度时程曲线如图 18-47 所示。

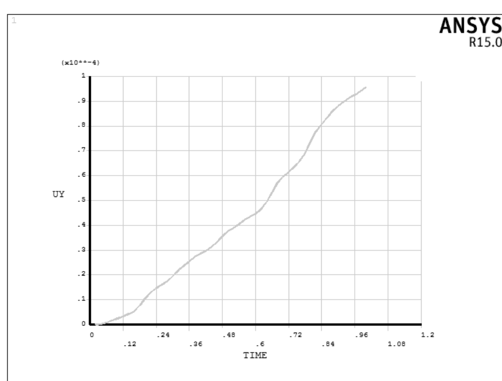


图 18-46　竖向位移时程曲线

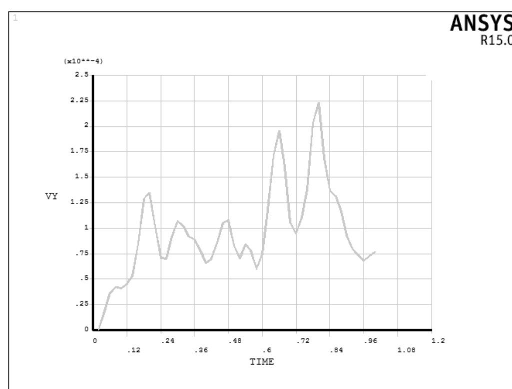


图 18-47　竖向速度时程曲线

竖向加速度时程曲线如图 18-48 所示。

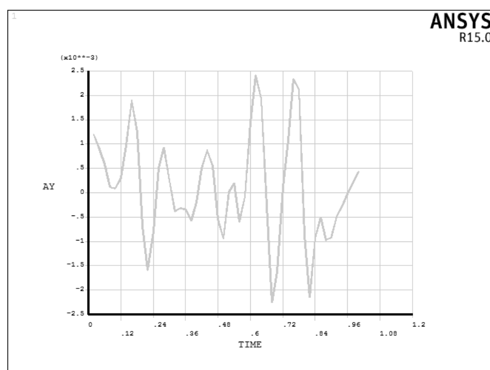


图 18-48　竖向加速度时程曲线

（2）站台中心水平位移、速度及加速度分析

```
/POST26
/AXLAB，Y，UX
NSOL，2，19，U，X，UX_2
PRVAR，2
PLVAR，2
```

```
/AXLAB，Y，VX
DERIV，3，2，1，，，，，1
PRVAR，3
PLVAR，3
/AXLAB，Y，AX
DERIV，4，3，1，，，，，1
PRVAR，4
PLVAR，4
```

得到水平位移时程曲线如图 18-49 所示，水平速度时程曲线如图 18-50 所示。

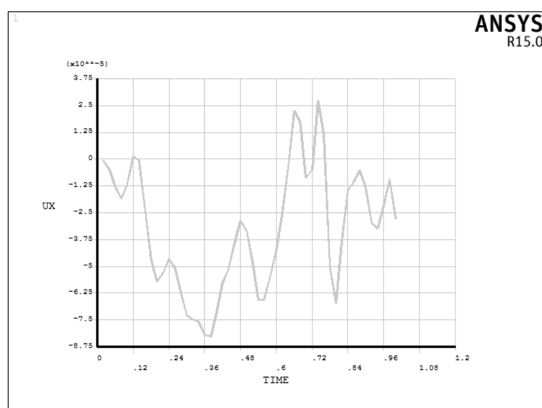


图 18-49　水平位移时程曲线

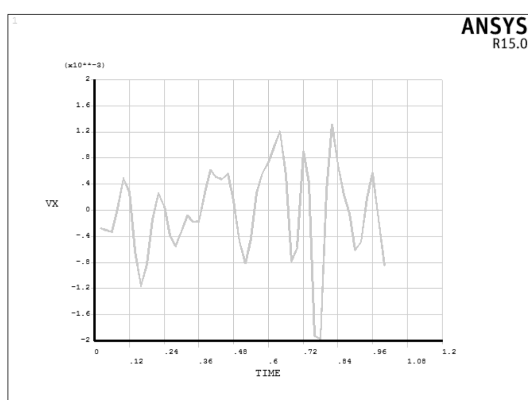


图 18-50　水平速度时程曲线

水平加速度时程曲线如图 18-51 所示。

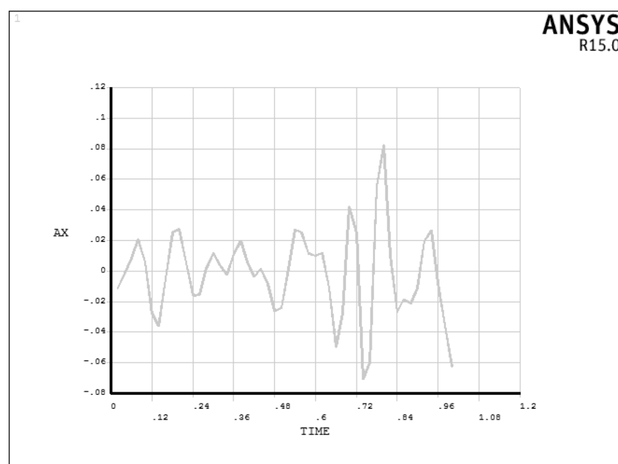


图 18-51　水平加速度时程曲线

由时间历程曲线可以得出各计算量的最大值，由此判断结构的安全性。

18.3 本章小结

本章主要学习了隧道工程相关问题的建模及分析方法。

首先对山体隧道开挖进行了仿真分析，充分利用了生死单元功能，通过本例用户应该已经熟练掌握了该功能的使用方法。

其后对地铁站台进行了地震荷载下的动力分析，并讲述了时间历程后处理的操作方法。

隧道开挖及地铁的动力响应分析分别是两类工程中最重要的计算环节。由于实际工况错综复杂，本章重点在于提供一种分析思路和软件的操作方法，用户应根据实际情况加以变通，以达到最接近实际的工程仿真效果，保障工程安全。



参 考 文 献

[1] 陆培毅，刘畅，顾晓鲁. 深基坑支护结构支撑系统简化空间分析方法的研究[J]. 岩土工程学报，2002，24(4).

[2] 沈祖炎，陈扬骥，陈以一. 钢结构基本原理[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.

[3] 张亚欧，等．ANSYS 7.0 有限元分析实用教程[M]．北京：清华大学出版社，2004.

[4] 王金龙，等．ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析[M]．北京：机械工业出版社，2010.

[5] 朱伯芳．有限单元法原理和应用[M]. 2 版．北京：中国水利水电出版社，1998.

[6] 白葳，喻海良．通用有限元分析 ANSYS 8.0 基础教程[M]．北京：清华大学出版社，2005.

[7] 王勖成，邵敏．有限单元法基本原理和数值方法[M]. 2 版．北京：清华大学出版社，1997.

[8] 徐礼华，池寅，李荣渝，苏洁．钢纤维混凝土深梁非线性有限元分析在 ANSYS 中的实现[J]. 岩土力学，2008(9).

[9] 卫星，强士中. 利用 ANSYS 实现斜拉桥非线性分析[J]. 四川建筑科学研究，2003(4).

[10] 王彦宏，薛建阳，赵鸿铁，杨勇. 用 ANSYS 程序进行型钢混凝土偏压柱的有限元分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2003，35(z1).

[11] 薛建阳，赵鸿铁，杨勇，等. 型钢混凝土柱粘结滑移性能及 ANSYS 数值模拟方法研究[J]. 建筑钢结构进展，2006，8(5).

[12] 博弈创作室．ANSYS 9.0 经典产品基础教程与实例详解[M]．北京：中国水利水电出版社，2006.

[13] 王焕定，吴德伦，等．有限单元法及计算程序[M]．北京：中国建筑工业出版社，1997.

[14] 王城泉，邹昀，郭翔．型钢混凝土柱的数值模拟分析[J]. 山西建筑，2011(29).

[15] 莫家兴．基于 ANSYS 的钢筋混凝土框架异型节点破坏机理模拟分析[J]．安徽建筑，2010(5).

[16] 王斌，张伟军．型钢高强高性能混凝土梁的抗剪性能分析[J]. 西安工业大学学报，2010(6).

[17] 姚海，崔小朝，禹海燕，温敏，王红霞．用 ANSYS 软件对锚杆-锚固剂-岩体有限元数值模拟[J]. 矿业快报，2008(5).

[18] 李浩月，周田朋，刘相新．ANSYS 工程计算应用教程[M]．北京：中国铁道出版社，2003.

[19] 龚曙光．ANSYS 工程应用实例解析[M]．北京：机械工业出版社，2003.

[20] 王妙芳，郭子雄．型钢混凝土柱的 ANSYS 数值模拟技术[J]. 华侨大学学报：自然科学版，2009(2).

[21] 秦艳．考虑粘结滑移的型钢混凝土柱有限元分析[J]. 山西建筑，2009(21).

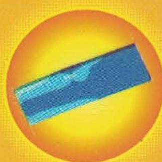
[22] 刘建军，叶柏龙，雷雨. 型钢混凝土(SRC)深梁数值模拟分析[J]. 四川建筑，2009(2).

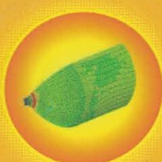
在线互动交流平台

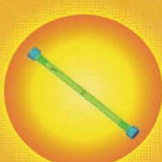
官方微博：http://weibo.com/cmpjsj
官方博客：http://blog.sina.com.cn/cmpbookjsj
读者信箱：cmp_itbook@163.com

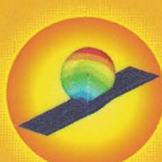
ANSYS 15.0

有限元分析从入门到精通









SolidWorks系列
AutoCAD系列
Creo系列
UG系列
CATIA系列
MATLAB系列
ANSYS系列
Mastercam系列

ANSYS系列已出版

- ANSYS 15.0 有限元分析从入门到精通
- ANSYS 14.5与HyperMesh 12.0 联合仿真有限元分析 第2版
- ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计
- ANSYS Workbench 14.5 数值模拟工程实例解析
- ANSYS 14.0 工程实例解析与常见问题解答
- ANSYS 14.0/FLOTRAN 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 14.0 理论解析与工程应用实例
- ANSYS 13.0 流场分析技术及应用实例
- ANSYS 13.0与HyperMesh 11.0联合仿真有限元分析
- FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通
- 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战
- ANSYS 12.0 土木工程应用实例解析
- ANSYS 12.0 有限元分析与范例解析
- ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析 第3版
- ANSYS 11.0 结构分析工程应用实例解析 第2版
- ANSYS 8.0 结构分析及实例解析

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 计算机/辅助设计
ISBN 978-7-111-47915-4
策划编辑◎ 张淑谦/ 封面设计◎



子时文化 ZiShi Culture

扫一扫加入微信公众平台
更多、更快获取最新图书资讯



ISBN 978-7-111-47915-4



定价：89.00元（含1DVD）